



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

MODELADO DE PAR

PILOTO/MOTO E

INFLUENCIA DE SU

POSTURA EN LA

CONDUCCIÓN

Autor: D. Juan Rodríguez González

Tutor: Dr. D. Juan Carlos García Prada

Leganés, Octubre 2015



Título:

Autor:

Director:

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

A Aránzazu y a todos los profesores que me han ayudado en esta tarea.

Resumen

El principal objetivo y motivación de este Proyecto es generar un modelo de piloto humano articulado que sea dimensional y funcionalmente representativo. Adicionalmente, se pretende estudiar la influencia de la postura sobre la dinámica de la motocicleta en movimiento. Se diferencian varias fases: modelado, verificación mediante ensamblaje y simulación, y estudios analíticos.

Para el modelado del piloto son necesarios estudios previos de anatomía y biomecánica, tras los cuales se decide justificadamente adoptar un modelo de 15 segmentos. Esto conduce a buscar unos datos fuente que proporcionen pesos y dimensiones adecuadas con los que modelizar cada uno de los segmentos.

Se dispone ahora de un conjunto de 15 elementos que, tras ser ensamblados representan un modelo humano cuyas dimensiones replican las tomadas como referencia, por lo cual, es considerado válido en este aspecto.

Para comprobar su validez funcional, se genera una simulación en la cual se dota a cada segmento de un movimiento armónico, y consecuente con la naturaleza de las articulaciones. Los resultados de esta animación verifican que dicho movimiento modifica el CdG del piloto, como es deseable.

Finalmente, se analiza la influencia de la postura del piloto sobre la dinámica de la motocicleta. Tras haber estudiado los fundamentos de la misma, y dada la naturaleza de los movimientos del piloto modelado en este Proyecto observados anteriormente, se toma la decisión de abordar en profundidad la influencia de la inclinación del piloto durante la fase de mantenimiento de giro en estado de equilibrio, mediante casos representativos. De estos, obtenemos las principales conclusiones del Proyecto y la confirmación de la validez del modelo.

Índice general

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| 1.1 | MOTIVACIÓN | 11 |
| 1.2 | OBJETIVOS..... | 12 |
| 1.3 | FASES DE DESARROLLO | 13 |
| 1.4 | ESTADO DEL ARTE: PUNTO DE PARTIDA..... | 14 |
| 1.4.1 | <i>Motocicleta</i> | 14 |
| 1.4.2 | <i>El piloto</i> | 33 |
| 2. | MODELADO DEL PILOTO | 34 |
| 2.1 | CONCEPTOS PREVIOS: ANATOMÍA Y BIOMECÁNICA | 34 |
| 2.1.1 | <i>Anatomía</i> | 34 |
| 2.1.1.1 | <i>Anatomía humana</i> | 36 |
| 2.1.1.2 | <i>Biomecánica</i> | 43 |
| 2.1.1.3 | <i>Decisión segregación elementos</i> | 52 |
| 2.1.1.4 | <i>Búsqueda modelo representativo: dimensiones y densidad</i> | 55 |
| 2.2 | SEGMENTOS DEL MODELO | 57 |
| 2.2.1 | <i>Segmento #1: Cabeza</i> | 57 |
| 2.2.2 | <i>Segmento #2: Cuello</i> | 61 |
| 2.2.3 | <i>Segmento #3: Torso</i> | 63 |
| 2.2.4 | <i>Segmento#4: Brazo izquierdo</i> | 69 |
| 2.2.5 | <i>Segmento #5: Brazo derecho</i> | 72 |
| 2.2.6 | <i>Segmento #6: Antebrazo izquierdo</i> | 72 |
| 2.2.7 | <i>Segmento #7: Antebrazo derecho</i> | 75 |
| 2.2.8 | <i>Segmento #8: Mano izquierda</i> | 75 |
| 2.2.9 | <i>Segmento #9: Mano derecha</i> | 78 |
| 2.2.10 | <i>Segmento #10: Muslo izquierdo</i> | 78 |
| 2.2.11 | <i>Segmento #11: Muslo derecho</i> | 81 |
| 2.2.12 | <i>Segmento #12: Pierna izquierda</i> | 82 |
| 2.2.13 | <i>Segmento #13: Pierna derecha</i> | 84 |
| 2.2.14 | <i>Segmento #14: Pie izquierdo</i> | 84 |
| 2.2.15 | <i>Segmento #15: Pie derecho</i> | 85 |
| 2.2.16 | <i>Enlace</i> | 86 |
| 2.3 | ENSAMBLAJE..... | 87 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 2.4 | COMPROBACIÓN DE REPRESENTATIVIDAD DEL MODELO→DOTACIÓN DE MOVIMIENTO..... | 88 |
| 2.5 | PASO A PASO DE LA ANIMACIÓN..... | 95 |
| 3. | ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PILOTO | 99 |
| 3.1 | PUNTO DE PARTIDA: ANÁLISIS TEÓRICO DINÁMICO | 99 |
| 3.2 | TRAYECTORIA RECTILÍNEA | 100 |
| 3.3 | MOMENTOS GIROSCÓPICOS | 101 |
| 3.4 | TRAYECTORIA CURVILÍNEA..... | 104 |
| 3.4.1 | <i>Fundamentos mantenimiento de curva</i> | <i>106</i> |
| 3.5 | TRANSMISIÓN DE FUERZAS..... | 111 |
| 3.6 | MODIFICACIÓN MOTOCICLETA REFERENCIA: ESTRIBERAS Y MANILLAR | 111 |
| 3.7 | CASOS A ESTUDIO. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 112 |
| 3.7.1 | <i>Caso #1: 100 km/h y 300 m de radio.....</i> | <i>113</i> |
| 3.7.2 | <i>Caso #2: 150 km/h y 300 m de radio.....</i> | <i>118</i> |
| 3.7.3 | <i>Caso #3: Movimiento en un solo eje.....</i> | <i>123</i> |
| 3.7.4 | <i>Caso #4: Otras inclinaciones.....</i> | <i>127</i> |
| 4. | CRONOGRAMA Y PRESUPUESTO | 128 |
| 4.1 | CRONOGRAMA | 128 |
| 4.2 | PRESUPUESTO | 129 |
| 5. | CONCLUSIONES Y PROYECTOS FUTUROS..... | 131 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 133 |
| | ANEXOS..... | 135 |

Índice de figuras

| | |
|---|-----|
| FIGURA 1 RELACIÓN PROYECTOS MOTOStudent | 11 |
| FIGURA 2 PARTES MOTOCICLETA | 14 |
| FIGURA 3 CURVA CARGA-DEFORMACIÓN HUESO | 45 |
| FIGURA 4 COMPOSICIÓN FIBRA MÚSCULO | 47 |
| FIGURA 5 EJES ELIPSE | 58 |
| FIGURA 6 EXPRESIÓN DE ONDA | 90 |
| FIGURA 7 TRASLACIÓN CDM REPRESENTATIVO | 98 |
| FIGURA 8 INCLINACIÓN VS TIEMPO | 105 |
| FIGURA 9 VELOCIDAD DADO ÁNGULO INCLINACIÓN | 108 |
| FIGURA 10 RADIO VS VELOCIDAD VS ÁNGULO DE INCLINACIÓN | 113 |

Índice de tablas

| | |
|---|-----|
| TABLA 1 UNIÓN COMPONENTES MOTO..... | 18 |
| TABLA 2 PESOS DE SEGMENTOS | 56 |
| TABLA 3 UNIÓN SEGMENTOS HUMANO..... | 89 |
| TABLA 4 MEJORA CASO 1 | 117 |
| TABLA 5 MEJORA CASO 2 | 122 |
| TABLA 6 MEJORA POR EJE | 124 |
| TABLA 7 MEJORA POR EJE, 2 | 126 |
| TABLA 8 VELOCIDAD VS ÁNGULO DE INCLINACIÓN VS RADIO | 127 |

Índice de ilustraciones

| | |
|--|-----|
| ILUSTRACIÓN 1 MOTOR Y SUS PARTES | 27 |
| ILUSTRACIÓN 2 TRANSMISIÓN | 28 |
| ILUSTRACIÓN 3 PILOTO ANTIGUOS PFC..... | 33 |
| ILUSTRACIÓN 4 PLANOS DIVISIÓN CUERPO | 42 |
| ILUSTRACIÓN 5 DIVISIÓN SEGMENTOS Y ARTICULACIONES..... | 53 |
| ILUSTRACIÓN 6 COMPROBACIÓN ALTURAS SEGMENTOS | 87 |
| ILUSTRACIÓN 7 VISTAS PILOTO ERGUIDO | 95 |
| ILUSTRACIÓN 8 VISTAS PILOTO DERECHA | 96 |
| ILUSTRACIÓN 9 VISTAS PILOTO IZQUIERDA | 97 |
| ILUSTRACIÓN 10 INFLUENCIA INERCIA | 100 |
| ILUSTRACIÓN 11 PARÁMETRO TRAIL..... | 100 |
| ILUSTRACIÓN 12 DESGLOSE DE FUERZAS PLANO MOTO | 107 |
| ILUSTRACIÓN 13 INFLUENCIA POSICIÓN PILOTO | 108 |
| ILUSTRACIÓN 14 SIMPLIFICACIÓN ÁNGULO EFECTIVO | 114 |
| ILUSTRACIÓN 15 TUMBADA 15° | 116 |
| ILUSTRACIÓN 16 TUMBADA 30°..... | 119 |
| ILUSTRACIÓN 17 TUMBADA 30° SIN ENLACE | 121 |
| ILUSTRACIÓN 18 EQUIVALENCIA TRASLACIÓN UN EJE | 123 |

1. Introducción

1.1 Motivación

Este Proyecto se inscribió originalmente dentro del Programa Motostudent, ante la propuesta de otros Proyectos anteriores que mencionaban la conveniencia de dotar a las simulaciones de un piloto articulado, que sustituyese al rígido que se usaba para las mismas.

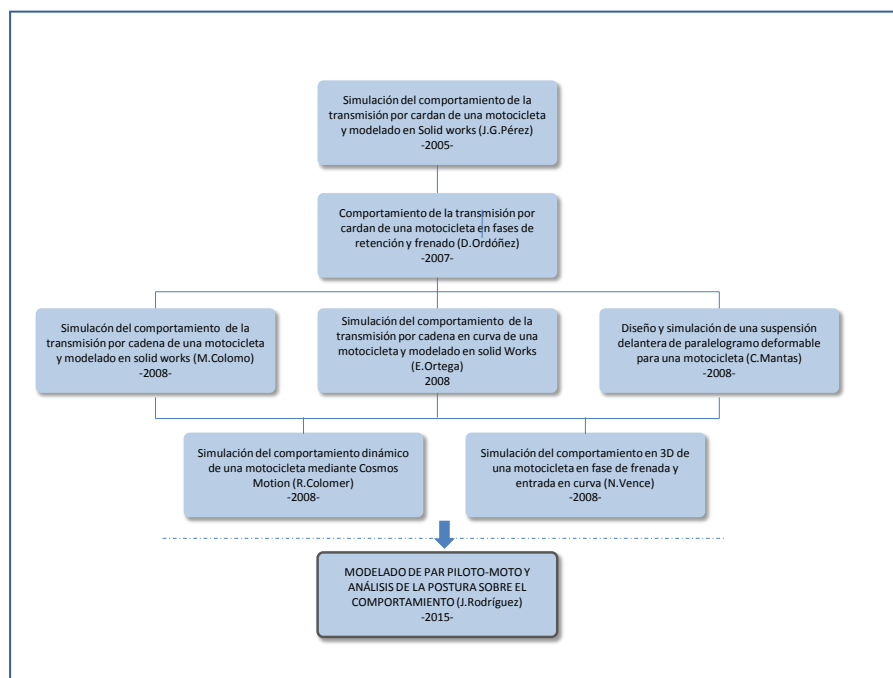


Figura 1 Relación Proyectos MotoStudent

De conseguir modelar un piloto articulado y representativo en cuanto a dimensiones y pesos, las simulaciones futuras serán más precisas en sus resultados, en tanto que el piloto afecta dinámicamente a la moto, y además a la vista serán más adecuadas a la realidad.

Para ello, se tomó como referencia el mecanismo de las motos de juguete de radiocontrol, que de manera sencilla, adecuan su postura a la curva que la moto está tomando y se aceptó el reto de encontrar los datos necesarios y las soluciones adecuadas para traducir dichos mecanismos y dotar a futuras simulaciones de un modelo humano

que poder usar con herramienta de Diseño y simulación elegida dentro del Programa (Solid Works y Cosmos Motion).

1.2 Objetivos

Como objetivos principales del Proyecto, enumeramos:

- I. Modelar un piloto dimensionalmente válido (en cuanto a morfología, a pesos y a dimensiones). Surgen varios subobjetivos:
 - ✓ Decisión justificada de segmentación tras observación del estado del arte.
 - ✓ Búsqueda estudios válidos/representativos (segregación entre géneros, espacio muestral representativo etc...).
 - ✓ Adaptar la distribución de segmentos elegida a los estudios antropomórficos disponibles.
 - ✓ Diseño de cada segmento.
 - ✓ Comprobación dimensional del ensamblaje de los segmentos.

- II. Demostración de representatividad funcional del modelo.
 - ✓ Demostración de posibilidad de dotación de movimiento → simulación con moto estática.
 - ✓ Comprobación de variación de CdG.

- III. Análisis teórico de dinámica de motocicleta desde el punto de vista de la variación de la postura del piloto
 - ✓ Decisión del enfoque del análisis justificada.
 - ✓ Análisis de influencia del piloto en el CDG global.
 - ✓ Conclusiones tras análisis de casos más representativos y estudios teóricos.

1.3 Fases de desarrollo

El Proyecto se organiza de la siguiente manera. Para detalle sobre tiempos y dependencias entre fases, se puede consultar el apartado “cronograma”.

- Análisis previos y planteamientos
- Análisis morfológico, biomecánico y antropométrico
- Recopilación y procesado de datos (datos directos y derivados)
- Modelado de segmentos
- Modelado/remodelado de segmentos
- Simulación y tareas asociadas
- Comprobación representatividad del modelo
- Análisis de la influencia del piloto
- Conclusiones

1.4 Estado del arte: Punto de partida

En este apartado se describirá el punto del cual partimos para conseguir nuestros objetivos, en especial la motocicleta, el piloto, y el entorno necesario para enfocar los siguientes apartados:

1.4.1 Motocicleta

Como soporte para las animaciones en las que se demostrará la representatividad del modelo humano modelado, se ha usado la moto presente en los anteriores PFCs, que fue modelada en Solid Works en 2007.

En concreto se trata de una Guzzi Daytona RS y consta de las siguientes partes principales:

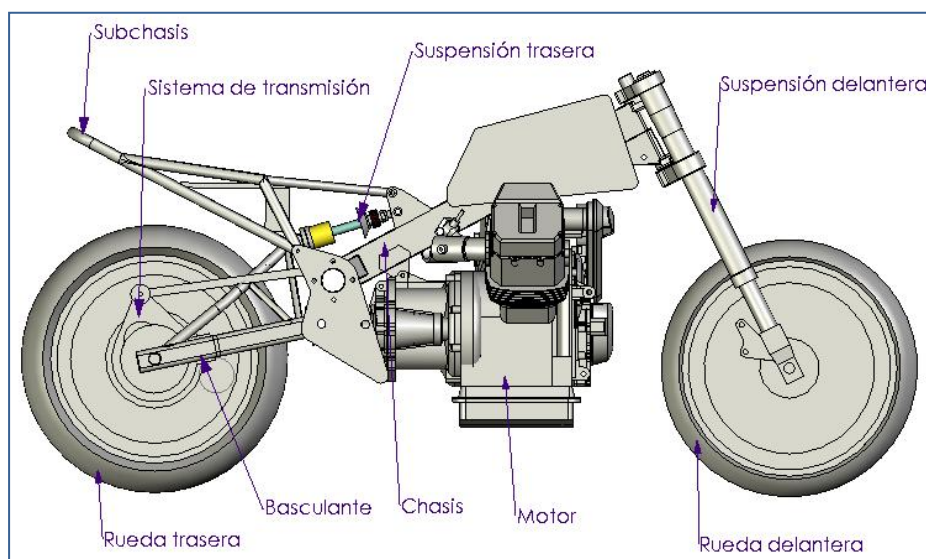
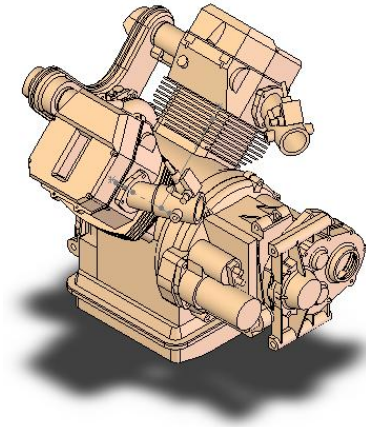


Figura 2 Partes motocicleta

Una breve descripción de los mismos:

Motor

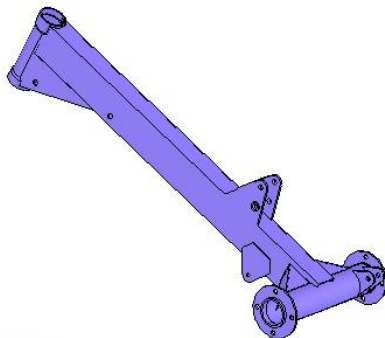


El ensamblaje está formado a su vez por otros dos subensamblajes, el bloque motor y la caja de cambios. Se trata de un motor de dos cilindros en V

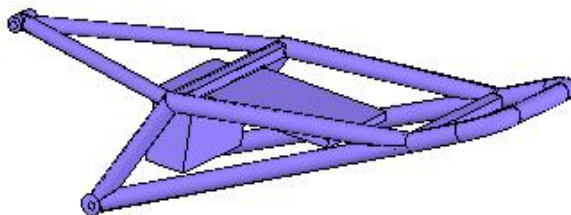
Chasis

Encargado de aportar rigidez y servir de soporte al resto de elementos y se subdivide en:

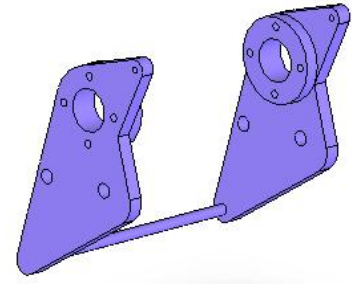
Chasis de espina central: Monopieza de sección rectangular, en chapa de acero.



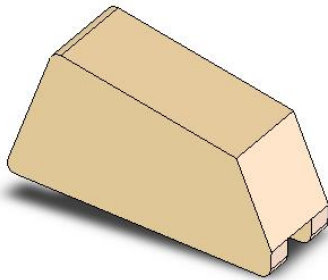
Subchasis: Estructura tubular que debe servir de soporte para el sillín.



Pletinas: Esta pieza tuvo que ser modificada para alojar las estriberas, inexistentes en el modelo original. Se describe con detalle más adelante. Aquí se muestran las originales.



Depósito



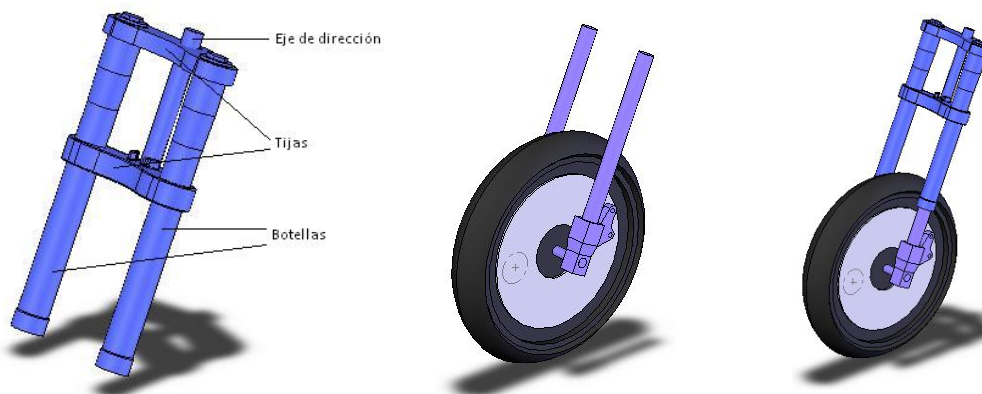
De manera análoga a las pletinas, se modificó para albergar la bisagra con el enlace, al que se dota de rotación para conseguir el movimiento del torso. Aquí se muestra el original.

Conjunto suspensión delantera

Compuesta por:

Ensamblaje barras tijas: Formado por el eje de dirección, las dos botellas de suspensión y por las dos tijas de aluminio.

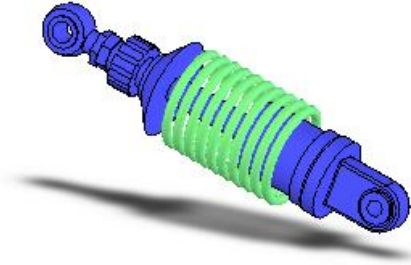
Respetando la geometría de este ensamblaje, se modeló como soporte para las manos del nuevo modelo de piloto, un manillar. Más adelante, se detalla su modelado.



Ensamblaje barras-rueda delantera: Formado por dos barras de 40mm de diámetro, por el eje de la rueda delantera, y la propia rueda.

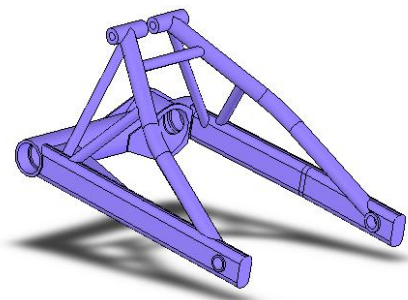
Conjunto suspensión trasera

Consta de:



Amortiguador trasero: Cuerpo + vástago. Unido al chasis por su parte superior y al basculante por la inferior.

Basculante: Proporciona los grados de libertad necesarios junto con la suspensión trasera para el acomodo de la rueda trasera al trazado, uniéndola con el chasis.



Rueda trasera: De mayor grosor que la delantera, se une al basculante mediante el eje trasero.



Uniendo estos elementos, se define el ensamblaje suspensión trasera:



La unión de los componentes queda:

| Junta | Tipo | Par de elementos | |
|-------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| Eje de dirección | Revolución | Chasis | Eje de dirección |
| Barra derecha | Traslacional | Barra derecha | Botella derecha |
| Barra izquierda | Traslacional | Barra izquierda | Botella izquierda |
| Rueda delantera | Revolución | Rueda delantera | Eje delantero |
| Amortiguador#1 | Revolución | Cuerpo amortiguador | Basculante |
| Amortiguador#2 | Traslacional | Cuerpo amortiguador | Vástago |
| Amortiguador#3 | Revolución | Vástago amortiguador | Chasis |
| Rueda trasera | Revolución | Rueda trasera | Eje de rueda |
| Basculante#1 | Revolución | Basculante | Eje de rueda trasera |
| Basculante#2 | Revolución | Basculante | Chasis |

Tabla 1 Unión componentes moto

Estos parámetros, aun siendo respetados en las simulaciones, son meras referencias para el alcance de este Proyecto, ya que los elementos que no sean de piloto se considerarán inmóviles, para simplificar las simulaciones.

1.4.1.1 Historia de la motocicleta

Para conocer los inicios de la “moto”, tenemos que viajar al siglo XIX, concretamente a 1818, año en el que se presentó en París la Velocipedraisidevapor, un modelo que se basaba en una bicicleta equipada con una caldera de vapor en la parte trasera, y que no tuvo demasiado éxito. En 1867, el norteamericano Sylvester Howard Roper (1823-1896) se aproximó más a lo que hoy conocemos como motocicleta, inventando un motor de dos cilindros a vapor (accionado por carbón). Esta es la que muchos consideran la primera motocicleta de la historia, pero todavía quedaba mucho en lo que mejorar.

Años más tarde, en 1885, los alemanes Wilhelm Maybach y Gottlieb Daimler daban otra vuelta de tuerca a la historia y construyeron una moto con cuatro ruedas de madera y un motor de combustión interna. Para crear este nuevo modelo, en el que por primera vez se unía una bicicleta con un motor de gasolina, Gottlieb Daimler usó un nuevo motor inventado por el ingeniero Nikolaus August Otto: el primer motor de combustión interna de cuatro tiempos en 1876. Lo llamó “Motor de Ciclo Otto” y, tan pronto como lo completó, Daimler (antiguo empleado de Otto) lo convirtió en una motocicleta. Su velocidad máxima era de 18 km/h y desarrollaba 0,5 caballos.



En 1894 Hildebrando y Wolf Müller presentan en Múnich (Alemania) la primera motocicleta fabricada en serie y con claros fines comerciales. La Hildebrando y Wolf Müller se mantuvo en producción hasta 1897. Poco a poco nos vamos acercando a lo que de verdad se conoce como el origen de la motocicleta, y no sólo por el diseño, sino por el término empleado para denominar a este vehículo. Los hermanos rusos Eugéne y Michel Werner, afincados en París, montaron un motor pequeño en una bicicleta. Al principio lo pusieron de distintas formas, y en 1898 se empezó a fabricar. “La Motocicleta”. Desde entonces, aunque todavía haya dudas sobre cuál es exactamente la

primera moto, lo que sí es cierto es que el nombre del modelo de los hermanos rusos es el que acabó definiendo a este vehículo de dos ruedas.

Con el paso de los años obviamente los diseños de la motocicleta fueron evolucionando, y si hay un momento clave en el desarrollo de estos vehículos, es la II Guerra Mundial (1939-1945). Y es que se tuvieron que adaptar varios modelos a las circunstancias que una guerra requiere, que pudieran meterse por todo tipo de terrenos, que fueran resistentes y a poder ser ligeras. Esto último lo logró más el ejército alemán con sus BMW que el norteamericano con las Harley-Davidson e Indian. Al volver de la II Guerra Mundial, los soldados estadounidenses parecían descontentos con las motocicletas que eran construidas por Harley-Davidson e Indian. Las motos que habían montado en Europa eran más ligeras y más divertidas de conducir. Los veteranos influyeron así de una manera determinante con sus vivencias en la evolución de determinados modelos.

Al hablar de vehículo de dos ruedas, distinguimos también entre motocicleta y scooter. Si consideramos scooter como un vehículo de dos ruedas, con una plataforma para los pies y un escudo frontal que proteja las piernas, entonces podremos determinar que el primer modelo se creó en Reino Unido: el Unibus. Se trata posiblemente del primer scooter completamente carenado de la historia, fabricado en 1920 por la Gloucestershire Aircraft Company en Cheltenham, con un motor de 270 cc, y carenado a imagen y semejanza del automóvil. El fabricante no ocultó en absoluto esta característica al afirmar en su publicidad la frase “the car on two wheels” (el coche de dos ruedas). Sin embargo, debido a su elevado precio y baja calidad se dejó de producir en 1925.



Pero antes de llegar hasta este diseño, al igual que con la motocicleta, se pasaron por varios modelos siendo el más representativo el desarrollado en 1902 por el francés Geroges Gauthier: la Auto-Fauteuil (autobutaca). Con este diseño, Gauthier buscaba crear una motocicleta con la comodidad de un coche. Este “scooter” tenía dos velocidades, silenciador y calentaba los pies. En 1905 costaba alrededor de 1.200 francos, unos 182

€ y sus principales usuarios fueron médicos, veterinarios y carteros rurales que debían moverse entre poblaciones a poca distancia. Su máxima producción fue alcanzada en 1910. Sin embargo, en 1914, con la irrupción de la I Guerra Mundial en Europa dejó de fabricarse completamente.

En 1935, el norteamericano E. Foster Salsbury, se interesa en estos nuevos vehículos y fabrica la Glide con un pequeño motor de 85 cc de dos tiempos debajo del sillín y un pequeño tanque de combustible, creando en 1937 Salsbury Corporation, que en 1946 presenta un nuevo scooter de mayores dimensiones, con carrocería aerodinámica, amplio parabrisas, rueda de repuesto y asiento independiente para el pasajero, pero no gozó del merecido reconocimiento y la firma cesó su actividad en 1949. En este momento a estos vehículos ya se les comenzaba a llamar “motoscooter”.



Tal vez, el mayor empuje a estas “motoscooter” lo diera la empresa, también americana, Cushman Motor, de Lincoln (Nebraska), dedicada hasta 1936 a motores para el equipamiento de las granjas, creando la mítica Cushman 53 Airbone, que nace en gran parte por el encargo del ejército estadounidense de proyectar un vehículo apto para ser lanzado en paracaídas, y de esta forma llega a Europa, durante la II Guerra Mundial convirtiéndose en fuente de inspiración de los ingenieros italianos, iniciándose la era italiana del scooter, que sin duda ha sido la más fructífera.

Entre 1945 y 47, durante la posguerra, tanto los ingenieros Ferdinando Innocenti y Cesare Pallavicino, como el mítico Enrico Piaggio junto al ingeniero aeronáutico Corradino D’Ascanio, crearon casi de forma paralela la Lambretta y la Vespa, que sientan las bases de los scooter que hoy en día circulan por nuestras calles.

Otro elemento a tener en cuenta en torno al mundo de las dos ruedas, es el sidecar, aunque éste se considera un complemento para la moto que además a lo largo de la historia no ha gozado de la misma popularidad que el scooter y la moto como tal. Viajamos a 1910, año en el que apareció el citado sidecar, un carro con una rueda lateral que se une al lado de la motocicleta. Consta de un bastidor (de una sola rueda) y de una carrocería que protege al pasajero. La motocicleta que lo arrastra, se convierte en un vehículo de tres ruedas y su conducción se controla mediante el giro del manillar, al no

poder ejecutarse la basculación. Ya había aparecido años antes, pero en bicicletas, y con la proliferación de los vehículos llamados “utilitarios”, desapareció prácticamente de la circulación.

1.4.1.2 Tipos de motocicleta

Desde que se crearan las motos hasta nuestros días, su evolución no ha sido sólo en base a nuevas tecnologías, materiales, y nuevos diseños, sino que se ha tenido muy en cuenta el tipo de uso que se hace de ellas, y viceversa. Y es que lo que nació como un nuevo medio de transporte, se ha convertido en algo mucho más que eso. Tener una moto y montar en ella es sinónimo de tener una nueva afición, una nueva pasión, con muchas vertientes: carretera, circuito, campo... De ahí que hoy en día encontramos varias categorías de la motocicleta con características muy determinadas en cada una de ellas.

Ciclomotor



En este caso, más que distinguirse por el tipo de uso que se hace de él, es por su cilindrada -hasta 50 cc-, potencia y velocidad máximas, tres datos más limitados que en una moto como tal. Además cuentan con un rango de circulación muy concreto. En cuanto al diseño, hoy en día encontraremos ciclomotores basados en

motos o scooter, siendo estos últimos los más populares.

Scooter

Los scooter son una variante de la motocicleta. Un scooter no es exactamente una moto, por lo general son vehículos más ligeros, con transmisión automática, de posición de conducción relajada y cómoda. Están principalmente pensados para moverte por ciudad. Algunas de las grandes diferencias respecto a las motos:



- Ruedas de entre 12 y 16 pulgadas, espacios bajo el asiento o en la parte delantera para guardar objetos, carenado completo.
- El motor del scooter suele hallarse bajo el asiento con una transmisión variable continua transfiriendo la potencia a la rueda

trasera.

- Incluyen una protección frontal para las piernas y un cuerpo que oculta toda o la mayor parte de la mecánica.
- La cilindrada máxima hoy en día en los scooter es de 650 cc. Los modelos de esta cilindrada se incorporan a una nueva categoría, maxiscoter, que combina la comodidad que ofrece una transmisión automática con las prestaciones de un motor de media cilindrada.

Custom

No es sólo un tipo de moto, es una filosofía de vida. Las motos custom se reconocen rápidamente por sus diseños. Son motos largas y bajas, muy pesadas, con una postura de conducción más erguida, y cuyas características técnicas de la moto llevan a su piloto a ir a velocidades no muy elevadas (prima en ellas el par motor y las revoluciones, no la potencia) y por espacios no muy estrechos. Dentro de esta filosofía hay muchos estilos de moto custom que se distinguen por los diseños de la carrocería, del manillar... en definitiva de la “customización” a la que se someten.



Turismo

La moto ideal para hacer kilómetros, como su propio nombre indica. Este tipo de motos ofrecen una postura de conducción de lo más confortable. El piloto va erguido, con los brazos colocados a una altura perfecta para evitar el agotamiento, cuenta además con protecciones aerodinámicas como es el caso del carenado (que protege del viento a las piernas), y la cúpula (que además en muchos casos es regulable en altura). Además

este tipo de moto está pensada para poder añadir tanto maletas laterales como baúl trasero, buscando la mayor comodidad a la hora de hacer viajes o rutas.



Existe una variante de este tipo de motos y son las Sport-Turismo. En líneas generales, se trata de motos que manteniendo una estética de estilo Turismo, adoptan motores deportivos (normalmente de otros modelos

deportivos de la marca que los crea), eso sí, reduciendo ciertos datos como la potencia y el par. En función del modelo, encontraremos motos sport-turismo en las que predomine más el carácter deportivo, y otras en las que los rasgos de las turismo sean los que predominen.

Trail

Este tipo de moto es de los más demandados en la actualidad. Se trata de motos que permiten al usuario adentrarse en caminos o pistas, o recorrer carreteras sin fin: las más versátiles. Si las Turismo permiten realizar viajes de la manera más confortable posible, las Trail son las auténticas compañeras de rutas. En líneas generales, se trata de motos altas, con unos neumáticos, reglaje de suspensiones y postura de conducción muy específica. En función de las cilindradas encontraremos: Trail Medias o Maxitrail, siendo las primeras de entre 600-800 cc y las segundas, de 800 cc en adelante (hay modelos de 1200 cc).



Deportivas



Este tipo de motocicleta cuenta con dos variantes: carretera y circuito. Son capaces de ofrecer las máximas prestaciones, con los mejores componentes y la última tecnología. Sus velocidades máximas son punteras, y en la actualidad han llegado a sobre pasar los 300

km/h. La posición de conducción de una moto deportiva es usualmente muy agresiva, en el sentido de que obliga al cuerpo a estar muy adelantado. Mejorando así no sólo la estabilidad, sino la aerodinámica.

Naked



En este segmento incluimos las motos que tienen diseño sin carenado, por lo que gran parte de su mecánica queda al descubierto. Se trata de uno de los segmentos más populares en el mercado, y debido a su alta popularidad han ido surgiendo

diferntes estilos de motos naced: Roadster, naked de gran cilindrada y ligeramente protegidas del viento, para efectuar trayectos largos; Streetfighter, naked de gran potencia y aptitudes más deportivas que una naked normal; y Scrambler, naked de estética clásica con ruedas adaptadas a tierra y de gran robustez.

Motocross

Motos diseñadas para el campo, con largas y blandas suspensiones, ruedas de tacos para asegurar el agarre y asientos muy altos, pensadas para ser manejadas casi siempre de pie. se aplica toda la potencia para sacarle la mayor aceleración posible



ya que no hace falta que tengan mucha velocidad. Se trata de motos que están pensadas para pilotar en circuitos, de manera que no cuentan con luces ni matrícula. No están homologadas para circular por vías públicas.

Enduro



La enduro es una moto que es un término medio entre la moto de cross y la moto de trail. Estéticamente es muy parecida a la moto de cross pero con luces y matrícula, y están homologadas. Tiene suspensiones muy cómodas para circular por terrenos "difíciles" y poder saltar con ella sin

problemas. En estas motos la potencia se busca a bajo y medio régimen para poder sortear cualquier zona sin problemas. Es importante destacar que este tipo de moto tiene

fuerza, se puede decir que el torque se obtiene rápidamente para subir cuestas muy empinadas, transitar por caminos difíciles, sortear rutas con barro, o campos pedregosos.

Trial



Las motocicletas de trial son la mínima expresión de una moto. Por el tipo de deporte que se practica con ellas, han de ser ligeras. La evolución ha terminado por hacer desaparecer su asiento y son motos que se manejan siempre de pie, con suspensiones muy blandas, manillar alto, y un chasis y depósito reducidos al

mínimo. Lo que más puede que llame la atención de ellas es la ausencia de sillín, ya que se conducen de pie para mejorar la maniobrabilidad. Estas motocicletas no se pilotan de forma tradicional, el acelerador en realidad se convierte en un generador de inercia y el embrague en un regulador de la inercia desde parado consiguiendo alcanzar la fuerza suficiente para superar pendientes de hasta un 200 % (es decir, completamente verticales) como se comprueba en las competiciones de trial.

Eléctricas

En vez de contar con un motor de explosión, con gasolina, se propulsan con un motor eléctrico alimentado por baterías, generalmente de iones de litio (Li-Ion). Su autonomía es de momento una de sus desventajas frente a las motos y scooter de gasolina

1.4.1.3 Mecánica de la motocicleta

1.4.1.3.1 Partes de la motocicleta

Motor

Es el elemento encargado de propulsar el vehículo. El motor de una moto es su corazón, y los diferentes tipos aplicados, dictan el carácter de la máquina. Normalmente va propulsada por un motor de gasolina de dos o cuatro tiempos (2T y 4T), aunque últimamente los dos tiempos están siendo reservados a las cilindradas más pequeñas debido a razones medioambientales por ello la mayoría de las motos de hoy en día son de cuatro tiempos. El motor de cuatro tiempos, aunque puede considerarse como el más versátil, ha de competir en las pequeñas cilindradas con el motor de dos tiempos, que le aventaja en simplicidad y ligereza. El motor transmite la potencia a la rueda trasera mediante el sistema de transmisión. En muchos casos, tiene también una función estructural, ayudando así al chasis a soportar los diferentes esfuerzos.

La lubricación se hace de modo común para el motor y el cambio, salvo en los dos tiempos (2T). La alimentación se hace por carburador. La disposición más frecuente hasta hoy día es, que la inyección de combustible los está desplazando por normativa ambiental (emisión de gases). La refrigeración del motor puede ser mediante aire o agua.



Ilustración 1 Motor y sus partes

Transmisión

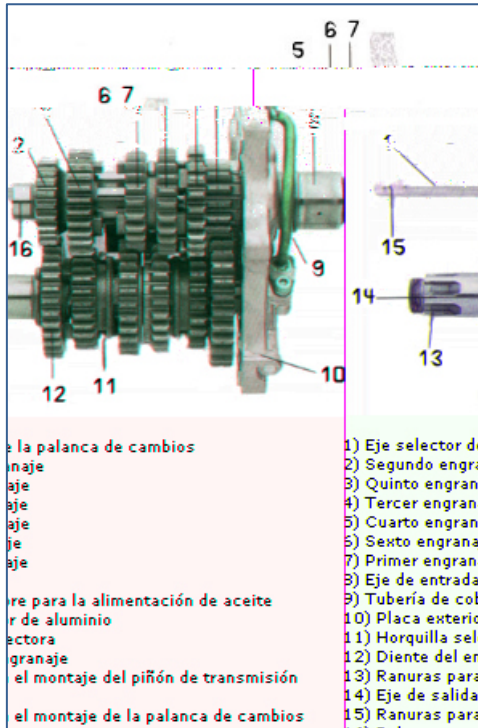


Ilustración 2 Transmisión

Es el encargado de transformar el movimiento generado en el motor llegue hasta la rueda trasera. El sistema de transmisión puede dividirse en cuatro partes principales:

Transmisión primaria:

Los elementos que se encargan de comunicar el movimiento del cigüeñal al embrague, reciben el nombre de transmisión primaria. Esta primera etapa en la transmisión suele estar dotada de una primera desmultiplicación, disminuyendo la velocidad de giro del eje al que se transmite el movimiento respecto del original. Los dos métodos más comunes para realizar la transmisión primaria

Transmisión secundaria

Se encarga de transmitir el movimiento desde la salida de la caja de cambios hasta la rueda trasera. La forma más habitual de transmitir este par es mediante cadena, aunque también es usada la transmisión mediante correa o incluso la transmisión tipo cardan.

- **Cardan:** Componente mecánico que permite unir dos ejes que giran en ángulo uno respecto del otro. Lleva la fuerza desde el motor a la rueda trasera.
- **Cadena:** Compuesta por un conjunto de eslabones, un plato dentado solidario a la rueda posterior y un piñón.
- **Correa:** Sistema similar al de la cadena, pero con una correa de caucho reforzada. El plato dentado y el piñón pasan a ser poleas dentadas que encajan perfectamente en la correa.

Embrague

Elemento intermedio entre la transmisión primaria y la secundaria cuya misión es conectar o desconectar la transmisión del movimiento desde el motor a la rueda, a voluntad del conductor de la motocicleta. La desconexión es necesaria al iniciar la marcha y cada vez que se utiliza el cambio. Aunque suele ir situado entre la transmisión primaria y el eje primario del cambio, también hay casos en los que está colocado directamente entre el cigüeñal y el primario. El primer hecho sucede siempre que es de tipo monodisco, y el segundo, después del variador, cuando se trata de un cambio automático.

Caja de velocidades

Se encarga de acoplar el motor y el sistema de transmisión con diferentes relaciones de engranajes, de tal forma que la misma velocidad de giro del cigüeñal puede convertirse en distintas velocidades de giro en las ruedas. La caja de velocidades facilita el funcionamiento del motor en el intervalo de velocidad estable comprendido entre los regímenes de par y de potencia máximos. Mediante ésta es posible obtener diversas velocidades angulares de giro del eje secundario para una misma del primario, o, lo que es lo mismo, distintos pares de salida para un mismo par de entrada.

La desmultiplicación de una marcha viene dada por el número de dientes que poseen los engranajes que la componen. Así, se determina la llamada “relación de transmisión”, la cual es el cociente entre el número de dientes del piñón conducido (el situado en el secundario) y el número de dientes del piñón conductor (dispuesto en el primario).

Chasis y subchasis

El chasis es la estructura cuya función principal es servir de apoyo y sujeción al resto de los elementos que conforman la motocicleta. Hace de soporte del motor, de punto de unión para los diferentes componentes del vehículo, se apoya en las suspensiones, da cabida a la carrocería y a los puestos de los ocupantes, y de sus características depende en gran medida la orientación de la moto y su estabilidad. La característica común de todos los chasis es unir el punto de pivote de la dirección (pipa de dirección) con el basculante, es decir, unir ambas ruedas. El subchasis sirve de apoyo para el piloto.

El chasis puede ser, según su tipo de estructura:

- **Tipo cuna:** Compuesto por tubos soldados y alberga al motor en su interior.
- **Multitubular:** Formado por muchos tubos cortos y rectos.
- **Doble viga:** Estructura formada por dos vigas que se unen por un lado en la pipa de dirección y por el otro se unen al basculante.

Basculante



Elemento que une la rueda trasera con el chasis. Consiste en una horquilla rígida que sujeta la rueda trasera y bascula sobre su eje para realizar la carrera de la suspensión. Se puede considerar que tiene tres puntos clave de unión. Uno es la unión con la rueda. Los otros dos relacionan el basculante con el chasis. Uno de ellos se encuentra en el extremo del basculante, donde pivota sobre el chasis, permitiendo así el recorrido de la suspensión trasera.

Ruedas

Las ruedas se componen de dos elementos, las llantas y los neumáticos, aunque en la mayoría de las ocasiones llevan anclados a ellas otros elementos como los frenos, elementos de transmisión o sistemas de medición.

- **Rueda trasera:** Es la rueda motriz, es decir, la que transmite los esfuerzos del motor al asfalto. Posee una banda de rodadura notablemente más ancha que la rueda delantera. Dispone de un sistema de frenado de pequeño tamaño.
- **Rueda delantera:** Se trata de la rueda directriz. La dirección se lleva a cabo por el giro del manillar, situado sobre la suspensión delantera, en él están instalados los dispositivos necesarios para el control de la motocicleta (palancas de accionamiento de los frenos, embrague, interruptores de las luces, etc). En esta rueda se sitúa el freno verdaderamente importante.

Suspensiones

La suspensión de una motocicleta es la encargada de mantener las ruedas en contacto con el suelo en todo momento, así como de procurar que las partes de la motocicleta que están ancladas a las ruedas, mantengan una trayectoria rectilínea con respecto al suelo. En función de las posibilidades de regulación de las suspensiones, variarán las sensaciones que perciba el piloto. La suspensión delantera y trasera, presentan una configuración diferente.

- **Suspensión delantera:** El sistema más empleado es la horquilla telescópica. Consiste en un par de tubos, botellas, dentro de los cuales deslizan las barras, de menor diámetro. Un extremo de las barras va fijo a la rueda y el otro a la tija, la cual gira para articular la dirección.
- **Suspensión trasera:** Une el chasis con el basculante, y su principal finalidad es la de mantener la rueda trasera en el suelo, para poder aplicar tanto el par motor, como el par de frenada. Se trata de un amortiguador que consta de un cuerpo y un vástago, este último se desliza por el interior del cuerpo en los movimientos de compresión.



Frenos

Su misión es la de reducir la velocidad del vehículo hasta detenerlo con la mayor efectividad posible, es decir, aunando potencia, control y dosificación. Para ello se complementan con sistemas ABS (en las motos no es obligatorio por el momento) o repartidores de frenada. La energía cinética que posee el vehículo, debido a su masa y a su velocidad, se transforma en energía calorífica, surgida del rozamiento de los elementos de fricción (que no giran) con las correspondientes superficies móviles, solidarias a las ruedas. Es importante conocer este principio, ya que la eficacia de frenado se mantiene, sólo si existe una eficaz disipación del calor generado. Los frenos más usados son los frenos de disco, siendo los sistemas tambor han quedado relegados a vehículos económicos.

Los sistemas de frenos más utilizados en las motocicletas son:

- **Freno de disco:** Compuesto por un disco que gira con la rueda, una bomba que establece presión, una pinza que la aplica a las pastillas y unos forros sobre éstas que rozan con el disco para decelerarlo. Este conjunto es más efectivo cuanto mayor sea el diámetro del disco, la presión de la bomba, el número de pistones de la pinza, su rigidez y la superficie de las pastillas.
- **Freno de tambor:** Consiste en una pista de forma cilíndrica que gira con la rueda y en cuyo interior se ubican un par de mordazas que copian su forma y están forradas de material de alto coeficiente de rozamiento. Un sistema de accionamiento manipulado por el conductor hace que estas zapatas se separen entre sí y rocen contra la pista interior del tambor, produciendo la deceleración deseada.

1.4.2 El piloto

Se parte de un piloto no articulado en una postura fija, que simplemente se monta dentro del ensamblaje sin más interacción posible.

Reseñar que su peso es tenido en cuenta en las simulaciones de proyectos anteriores. Su masa es de 84,14 kilogramos, y en consecuencia, para poder sustituye en la línea de PFCs realizados con anterioridad este modelo por cualquier otro, se deberá asimilar el peso o realizar correcciones en diversos parámetros de la simulación.

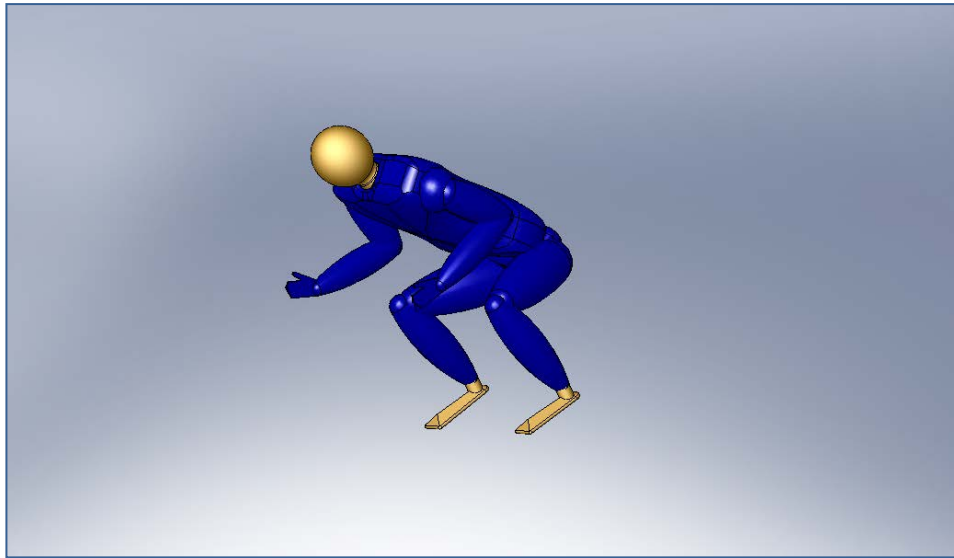


Ilustración 3 Piloto antiguos PFC

2. Modelado del piloto

2.1 Conceptos previos: Anatomía y biomecánica

2.1.1 Anatomía

Esta ciencia cuyo nombre viene del vocablo griego “anatémnein” que significa “disección”, se define como: “Ciencia que estudia la estructura y forma de los seres vivos y las relaciones entre las diversas partes que los constituyen”. (Española).

Se trata de una ciencia muy antigua, cuyos orígenes se remontan a la prehistoria. Durante siglos los conocimientos anatómicos se han basado en la observación de plantas y animales diseccionados. Sin embargo, la comprensión adecuada de la estructura implica un conocimiento de la función de los organismos vivos. La anatomía es casi inseparable de la fisiología, que a veces recibe el nombre de anatomía funcional.

Historia de la anatomía

Prehistoria: La anatomía occidental tuvo su origen en el Imperio Helénico. Existen muchas pinturas rupestres en diversas cavernas que narran cardiotomías (incisión quirúrgica del corazón) de mamuts, traqueotomías aplicadas a equinos, y diversas miotomías sobre todo exployadas gráficamente a los animales anteriores, en las que se empleaba instrumentación elaborada finamente con piedra trabajada y puntas de madera.

Edad de Bronce: La anatomía tomó un fuerte impacto centralizado en Asia. La India fue la principal fuente de conocimientos anatómicos para todas las escuelas de enseñanza de la antigua ciencia médica, empezando a expandir sus enseñanzas en China, el Medio Oriente y África. En la India Charaka Samhita, el registro de escritura más antiguo de medicina interna, realizó exploraciones anatómicas topográficas en cadáveres humanos sobre todas las estructuras. Fue el primero en descubrir el aparato circulatorio, alrededor del siglo III a. C. Charaka estableció un método sobre prevención de la salud, funcional hasta la actualidad, por lo que es también considerado a nivel mundial como el padre de la medicina preventiva, la cirugía plástica y la medicina interna.

Edad Antigua: Las disecciones de la Escuela de Alejandría, donde destacó Erasístrato, basan el conocimiento anatómico aceptado por Galeno en la Roma clásica, quien, aportó algunos datos a raíz de unas pocas disecciones en humanos y, sobre todo, en cerdos y monos.

Edad Media: El conocimiento anatómico de la Edad Media se basa en la aceptación de la anatomía galénica. Las clases impartidas por el profesor se hacían con el texto de Galeno, y las escasas disecciones en cadáveres eran realizadas por un practicante mientras se leía al clásico.

Edad Moderna: Tras una serie de descubrimientos por parte de los llamados anatomistas prevesalianos, Andrea Vesalio, considerado como el padre de la anatomía moderna, se dedica a la disección de cadáveres para la obtención de conocimiento anatómico. Plasmó sus observaciones en su “De humani corporis fabrica”, que marcará la anatomía hasta nuestros días.

Edad Contemporánea: La anatomía tuvo que vivir la aparición del microscopio, que abrió un nuevo mundo descriptivo: la anatomía microscópica, y la paulatina conversión de la anatomía en dinámica a partir de la estática fábrica de Vesalio, incorporando función y relación dentro de sus observaciones.

Vertientes de la anatomía

La anatomía, que es una de las ciencias básicas de la vida, está muy relacionada con la medicina y con otras ramas de la biología. Es conveniente subdividir el estudio de la anatomía en distintos aspectos según el tipo de organismo en estudio; en este caso las subdivisiones principales son la anatomía de las plantas y la anatomía animal.

A su vez, la anatomía animal se subdivide en anatomía humana (que es la que nos interesa en este caso) y anatomía comparada, que establece las similitudes y diferencias entre los distintos tipos de animales.

La anatomía también se puede dividir en procesos biológicos, por ejemplo, anatomía del desarrollo (estudio de los embriones) y anatomía patológica o estudio de los órganos enfermos.

Otras subdivisiones, como la anatomía quirúrgica y la anatomía artística, se basan en la relación de la anatomía con otras actividades bajo el título general de anatomía aplicada. Existe otra clasificación más de la anatomía en función de las técnicas empleadas, como por ejemplo la microanatomía, que se basa en las observaciones obtenidas con ayuda del microscopio.

2.1.1.1 Anatomía humana

Esta ciencia de carácter práctico y morfológico se encarga principalmente de estudiar las estructuras macroscópicas del cuerpo humano. Bajo una visión sistemática, el cuerpo humano está organizado en diferentes niveles de jerarquización. Está compuesto de aparatos integrados por sistemas, que a su vez están compuestos por órganos, que están compuestos por tejidos, que están formados por células, que están formados por moléculas, etc.

Dentro de la compleja división en sistemas, este Proyecto se centra en el sistema locomotor, y por lo tanto en la definición y funcionamiento del esqueleto, la musculatura, así como en el sistema nervioso y la influencia de éste en el funcionamiento del locomotor.

Sistema locomotor

Esqueleto

El esqueleto humano es un armazón que constituye el soporte rígido del cuerpo. Está formado por 206 huesos que se unen por articulaciones, protegidas a su vez por unas bandas, de tejido resistente y poco elástico, denominadas ligamentos.



La dureza de los huesos se debe a sus componentes minerales (alrededor de dos tercios). Además poseen cierta elasticidad gracias a sus componentes orgánicos (un tercio). Ambas cualidades son indispensables para la solidez de los huesos. Si el hueso fuese demasiado rígido sería quebradizo y si fuese demasiado flexible sería deformable.

Hay tres formas de huesos:



- **Huesos largos:** Forman las extremidades. Resisten bien las cargas. Algunos ejemplos son el cúbito y el radio, cuya longitud es la dimensión que domina.
- **Huesos cortos:** Son duros y resistentes ante todo tipo de presión y golpe. Actúan sobre todo como pieza de rodamiento, los encontramos en la muñeca, el tobillo...
- **Huesos planos:** Son muy resistentes, elásticos, aunque frágiles si se les da un golpe directo. Algunos son: el omóplato, las costillas, los del cráneo.

Funcionalmente, el esqueleto se divide en dos partes:

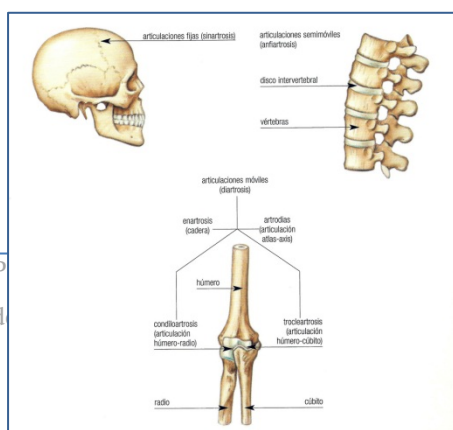
- **Axial o central:** Constituido por esqueleto de la cabeza o cráneo, la columna vertebral, la caja torácica.
- **Apendicular o extremidades:** Formado por dos pares de extremidades que se unen al tronco por unos intermediarios óseos que se llaman arcos o cinturas.

Articulaciones

Los diferentes huesos del cuerpo están unidos unos a otros para permitir movimientos. Las uniones entre huesos se llaman articulaciones. En las superficies de contacto los huesos están recubiertos de un cartílago protector frente a rozamientos. Algunas articulaciones además tienen una cápsula fibrosa dura recubierta de líquido sinovial que es lubricante.

Las articulaciones están mantenidas por bandas de tejido conjuntivo denso llamadas ligamentos. Por tanto la función de una articulación es permitir que se produzcan movimientos entre dos huesos, y su presencia hace que el esqueleto en su conjunto sea flexible.

Tipos de articulaciones



- **Sinartrosis**, que son articulaciones rígidas, sin movilidad, como las que unen los huesos del cráneo. Estas articulaciones se

mantienen unidas por el crecimiento del hueso, o por un cartílago fibroso resistente.

- **Sínfisis**, son aquellas que presentan movilidad escasa como la unión de ambos pubis. Estas articulaciones son móviles debido a que se mantienen unidas por un cartílago elástico.
- **Diartrosis**, articulaciones móviles como las que unen los huesos de las extremidades con el tronco (hombro, cadera). Las articulaciones móviles tienen una capa externa de cartílago fibroso y están rodeadas por ligamentos resistentes que se sujetan a los huesos. Los extremos óseos de las articulaciones móviles están cubiertos con cartílago liso, y lubricados por un fluido espeso denominado líquido sinovial producido por la membrana sinovial.

Músculos

El sistema muscular humano constituye en torno al 40% del peso corporal. Está constituido por más de 650 músculos que difieren en tamaño y forma, y que se clasifican en:

- **Músculo cardíaco**: Este tipo de tejido muscular forma la mayor parte del corazón de los vertebrados. El músculo cardíaco carece de control voluntario.
- **Músculo liso**: El músculo liso constituye el músculo intrínseco del tubo digestivo, los vasos sanguíneos, el aparato genitourinario (uréteres, vejiga), las vías respiratorias y otros órganos huecos y tubulares, músculos erectores del vello de la piel y músculos ciliados del cristalino.
- **Músculo esquelético**: Este tipo de músculo está compuesto por fibras largas rodeadas de una membrana celular, el sarcolema. Las fibras son células fusiformes alargadas que contienen muchos núcleos y en las que se observa con claridad estrías longitudinales y transversales.

Los músculos esqueléticos están inervados a partir del sistema nervioso central, y debido a que éste se halla en parte bajo control consciente, se llaman músculos voluntarios. La mayor parte de los músculos esqueléticos están unidos a zonas del esqueleto mediante inserciones de tejido conjuntivo llamadas tendones. Las contracciones del músculo esquelético permiten los movimientos de los distintos

huesos y cartílagos del esqueleto. Los músculos esqueléticos forman la mayor parte de la masa corporal de los vertebrados.



Sistema nervioso

El sistema nervioso se divide en somático, que efectúa el control voluntario sobre los músculos esqueléticos, y autónomo, que es involuntario y controla el músculo liso, el músculo cardíaco y las glándulas. El sistema nervioso autónomo se divide en dos: simpático y parasimpático. La mayoría de los músculos y las glándulas poseen una doble inervación; en tales casos las dos divisiones pueden ejercer efectos opuestos. Por ejemplo, el sistema simpático aumenta la frecuencia de los latidos cardíacos y el parasimpático la disminuye. Sin embargo, los dos sistemas nerviosos no son siempre antagonistas. Por ejemplo, los dos sistemas inervan las glándulas salivares y estimulan las células secretoras.

Los movimientos voluntarios de la cabeza, las extremidades y el cuerpo se deben a los impulsos nerviosos que proceden del área motora de la corteza cerebral, que son transmitidos por los nervios craneales o por los que nacen en la médula espinal con destino a los músculos esqueléticos.

La acción implica la excitación de las células nerviosas que estimulan los músculos afectados y la inhibición de las células que estimulan los músculos opuestos. Un impulso nervioso es un cambio en el potencial eléctrico dentro de una fibra o célula nerviosa, que se mide en milivoltios, dura pocos milisegundos y se puede registrar mediante electrodos. Los movimientos pueden ocurrir también como respuesta directa a un estímulo externo. Estas respuestas involuntarias se llaman reflejos. Los receptores, diversas terminaciones nerviosas, envían de forma continua impulsos hacia el sistema nervioso central.

Hay tres tipos de receptores: exteroceptores, sensibles al dolor, temperatura, tacto y presión y en general a cualquier estímulo que proviene del exterior pero que se encuentra en contacto con el cuerpo; interoceptores, que reaccionan a cambios en el medio interno, y propioceptores, que responden a variaciones en el movimiento, posición y tensión y suelen estar localizados en los músculos. Estos impulsos finalizan en algunos casos en la médula espinal y en la mayoría en áreas especiales del cerebro, de la misma forma que los receptores especiales de la visión, la audición, el olfato y el gusto. Las contracciones musculares no siempre producen un movimiento real. En la mayoría de los músculos existe una pequeña fracción del número total de fibras que se contraen de forma continua. Esto permite mantener la postura de una extremidad y la capacita para resistir la elongación o el estiramiento pasivo. Esta leve contracción mantenida se denomina tono muscular.

Morfología

La morfología es la disciplina encargada del estudio de la forma y estructura de un organismo o sistema. A su vez, esta disciplina cuenta con diferentes categorías:

- **Morfología descriptiva:** Se encarga de la descripción y comparación de las formas orgánicas.
- **Morfología teórica:** Tiene como principal objetivo el estudio de las constricciones morfológicas. Dentro de esta disciplina encontramos la morfometría, que es la encargada de cuantificar la morfología de los organismos, reduciendo los especímenes a abstracciones numéricas. Las

herramientas de modelización más utilizadas para tal fin son los patrones logarítmicos, la geometría fractal y los autómatas celulares.

- Morfología funcional: Se ocupa del estudio de la forma orgánica y las características en relación con la función.
- Morfología evolutiva: Se ocupa del estudio de la historia de la forma orgánica.

Plano anatómico estándar

En el caso del cuerpo humano, para poder llevar a cabo un correcto estudio de morfología se hizo necesario establecer una posición única que permitiera la descripción definiendo así una correcta posición anatómica, de manera que los planos anatómicos (hallados en esta posición) son las referencias espaciales que sirven para describir la disposición de los diferentes tejidos, órganos y sistemas, y las relaciones que hay entre ellos.

La posición anatómica es aquella que, por convención, se considera adecuada para el estudio anatómico del cuerpo humano. Consiste en el cuerpo erecto (de pie), con la cabeza y cuello también erectos, mirando al frente, hacia adelante, con los brazos extendidos hacia abajo, a cada lado del cuerpo, con las palmas de las manos vueltas hacia adelante (antebrazos en supinación), las puntas de los dedos mirando al suelo, las piernas extendidas y juntas (en aducción), y los tobillos y pies igualmente extendidos (de puntillas, con la punta del pie señalando hacia abajo). En relación a la cara, ésta queda mirando al frente. En esta posición, el vientre (palma) de cada mano es de situación “ventral”, mirando hacia adelante, pero la planta de cada pie (vientre) mira hacia atrás y es de posición dorsal.

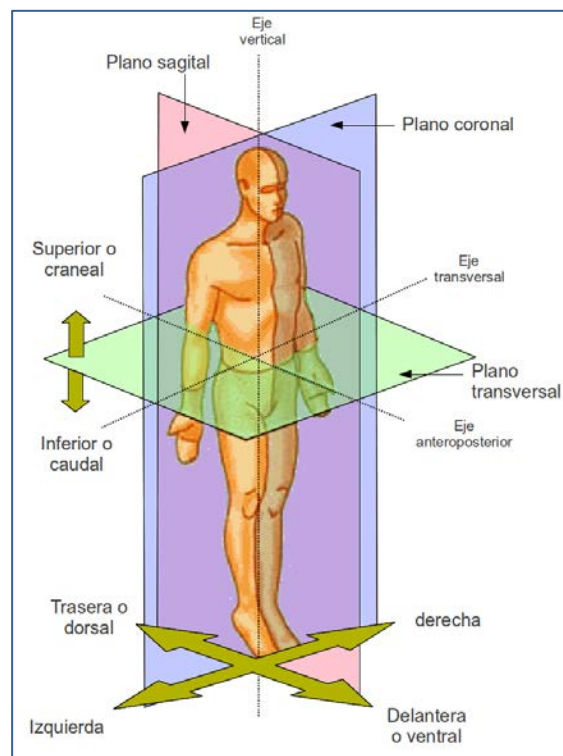


Ilustración 4 Planos división cuerpo

Los tres ejes del espacio son:

- El eje vertical va de la cabeza a los pies: es un eje “cráneo-caudal” (“cabeza-cola”).
- El eje transversal va de lado a lado: es un eje latero-lateral.
- El eje anteroposterior va de delante hacia atrás: es un eje ventro-dorsal.

Los tres ejes conforman los planos del espacio, que principalmente son:

- El plano horizontal se forma al sumar los ejes anteroposterior y laterolateral y se llama plano transversal.
- El plano transversal es perpendicular al eje vertical, que va de la cabeza a los pies y divide al cuerpo en una parte inferior (podálica o caudal) y en otra parte superior (craneal o cefálica).
- El plano sagital está formado por los ejes anteroposterior y vertical y corresponde al plano que contiene a la cuerda y al arco del centauro que representa el signo del zodiaco llamado sagitario. Este plano divide al cuerpo en dos mitades simétricas (es el único plano que lo hace).

- El plano coronal o frontal está formado por los ejes transversal y vertical y divide al cuerpo en una parte ventral o anterior y dorsal o posterior.

Los términos que se emplean en el estudio de los huesos en función de los planos son:

- Superior (o craneal) e inferior (o caudal) para indicar las partes según estén hacia el cráneo o hacia las extremidades en base al corte del plano transversal.
- Proximal y distal para referirse a la ubicación de un punto del hueso según esté hacia el cráneo o hacia las extremidades.
- Medial y lateral, según el rasgo esté más próximo o alejado del eje central del cuerpo (plano sagital).
- A partir del plano coronal, se definen las características en anteriores (o ventrales) y posteriores (o dorsales).

2.1.1.2 Biomecánica

La biomecánica se considera una rama de la bioingeniería y de la ingeniería biomédica. La bioingeniería es un campo interdisciplinar en el que los principios y métodos de la ingeniería, las ciencias básicas y la tecnología se aplican para diseñar, evaluar y manufacturar la equipación para su uso en medicina y comprender, definir y solventar problemas en la fisiología y en la biología. La investigación en biomecánica tiene como objetivo mejorar nuestro conocimiento de una estructura muy compleja: el cuerpo humano.

La biomecánica utiliza las aplicaciones de la mecánica clásica para el análisis de los sistemas biológicos y fisiológicos. Por ejemplo, los principios de la estática han sido aplicados para analizar la magnitud y la naturaleza de las fuerzas implicadas en varias articulaciones y músculos del sistema músculoesquelético. Los principios de dinámica han sido utilizados para la descripción del movimiento, el análisis de marcha, el análisis del movimiento segmentario y tienen muchas aplicaciones en la mecánica deportiva.

En otras palabras, podríamos adelantar una definición de la biomecánica como la ciencia que aplica las leyes del movimiento mecánico en los sistemas vivos, especialmente en el aparato locomotor, que intenta unir en los estudios humanos la mecánica al estudio de la anatomía y de la fisiología, y que cubre un gran abanico de sectores a analizar desde estudios teóricos del comportamiento de segmentos corporales a aplicaciones prácticas en el transporte de cargas. Al analizar el movimiento en la persona, la biomecánica trata de evaluar la efectividad en la aplicación de las fuerzas para asumir los objetivos con el menor costo para aquellas y la máxima eficacia para el sistema productivo.

División biomecánica del cuerpo

Al igual que en lo que a la anatomía se refiere entendemos que el cuerpo humano cuenta con diferentes sistemas, desde el punto de vista de la biomecánica nos encontramos también con un sistema musculoesquelético que comprende diferentes elementos a estudiar.

Biomecánica del hueso

El objetivo del sistema esquelético es proteger a los órganos internos, proporcionar uniones cinemáticas rígidas y lugares de inserción muscular, y facilitar la acción muscular y el movimiento corporal. El hueso posee propiedades estructurales y mecánicas únicas que le permiten desarrollar estas funciones. El hueso está entre las estructuras más duras del cuerpo, sólo la dentina y el esmalte de los dientes son más duros. Es uno de los tejidos más dinámicos y metabólicamente activos en el cuerpo, y permanece activo a lo largo de toda la vida. Es un tejido ricamente vascularizado que tiene una excelente capacidad de autoprparación y puede alterar sus propiedades y configuración en respuesta a cambios en la demanda mecánica. Por ejemplo, se observan cambios en la densidad ósea frecuentemente tras períodos de desuso y de uso notablemente aumentado; se aprecian cambios durante la curación de una fractura y después de ciertas operaciones. Así, el hueso se adapta a las demandas mecánicas impuestas sobre él.

El tejido óseo puede considerarse como un material compuesto de dos fases, con el mineral como una fase y el colágeno y la sustancia fundamental como otra. Estos

materiales compuestos por un elemento fuerte y vidriado incrustado en uno más débil y flexible, son más fuertes en relación a su peso que una sustancia.

Funcionalmente, las propiedades mecánicas más importantes del hueso son su fuerza y rigidez. Estas y otras características pueden entenderse mejor en el caso del hueso, o cualquier estructura, examinando su comportamiento bajo carga, es decir, bajo la influencia de fuerzas aplicadas externamente. La carga causa una deformación o un cambio en las dimensiones de la estructura. Si una carga en una dirección conocida se aplica sobre una estructura puede ser medida y representada en una curva de carga-deformación. Se puede extraer mucha información sobre la fuerza, la rigidez y otras propiedades mecánicas observando esta curva.

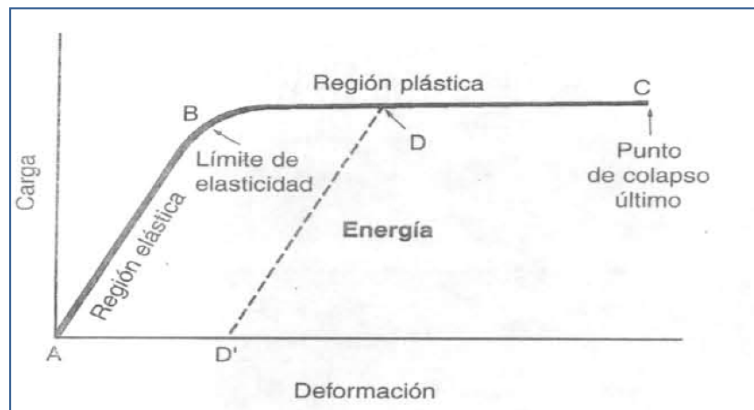
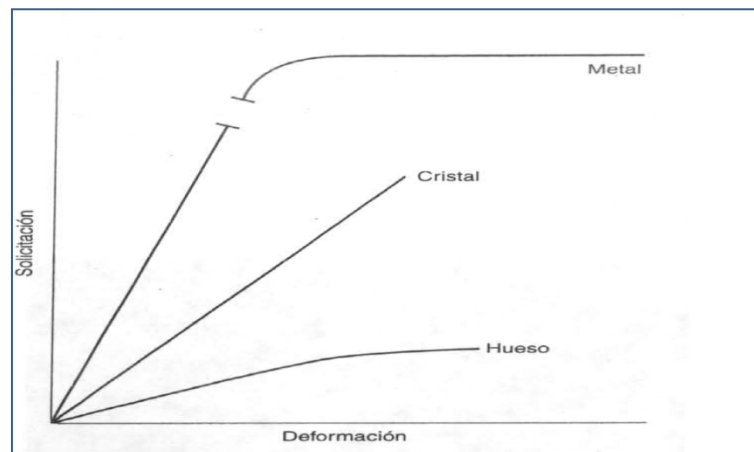


Figura 3 Curva carga-deformación hueso

La imagen superior representa una curva de carga-deformación para una estructura compuesta de un material plegable cualquiera. Si una carga se aplica dentro del rango elástico de la estructura (A a B en la curva) y luego se libera, no se produce deformación permanente. Si la carga continúa pasado el límite de elasticidad (B) hacia el rango plástico de la estructura (B a C sobre la curva), y luego se libera, se produce una deformación permanente. La cantidad de deformación permanente que se produce si la estructura se carga hasta el punto D en la región plástica y luego se deja de cargar, se representa por la distancia entre A y D. Si la carga continúa dentro del rango plástico, se alcanza el punto de colapso último (C). La curva de carga-deformación es útil para determinar las propiedades mecánicas de estructuras completas, como todo el hueso, un ligamento o tendón entero, o un implante metálico.

Caracterizar un hueso u otras estructuras en términos del material del que está compuesto, independientemente de su geometría, requiere estandarizar las condiciones

de medición del tamaño y de la forma de los especímenes de medición. Se pueden usar unidades de medida más precisas cuando se evalúan las muestras estandarizadas, esto es, la carga por unidad del área de muestra (solicitud) y la cantidad de deformación en términos del porcentaje de cambio en las dimensiones de la muestra. La curva generada es una curva de solicitud-deformación.



Curva de solicitud-deformación

En estas curvas esquemáticas de solicitud-deformación se aprecian las diferencias para los materiales metal, cristal y hueso. El metal tiene la pendiente más pronunciada en la región elástica, de modo que resulta el material más rígido. La porción elástica de la curva para el metal es una línea recta, indicando un comportamiento linealmente elástico. El hecho de que el metal tenga una larga región plástica indica que este material dúctil típico se deforma extensamente antes del colapso. El cristal, un material vidriado, exhibe un comportamiento linealmente elástico, pero se colapsa abruptamente con una pequeña deformación, como se indica por la falta de una región plástica sobre la curva de solicitud-deformación. El hueso posee tanto cualidades vidriadas como dúctiles demostradas por la ligera curva en la región elástica. Que indica que el hueso cede durante la carga dentro de esta región.

Biomecánica del músculo esquelético

Como ya hemos visto en la parte de anatomía, el sistema muscular está compuesto por tres tipos de músculos: cardíaco, liso y esquelético. En lo que respecta a este Proyecto, nos centraremos en los detalles del músculo esquelético. El músculo esquelético es el tejido más abundante del cuerpo humano, suponiendo del 40 al 45 % del peso total del cuerpo. El cuerpo humano tiene un total de 430 músculos esqueléticos

que se encuentran por pares a ambos lados del cuerpo. Los movimientos más vigorosos están producidos por menos de 80 pares.

Los músculos proporcionan fuerza y protección al esqueleto distribuyendo cargas y absorbiendo impactos; permiten a los huesos moverse sobre sus articulaciones, y permiten el mantenimiento de una postura corporal frente a una fuerza. Tales capacidades normalmente representan la acción de grupos musculares, no de músculos individuales.

Los músculos esqueléticos realizan tanto trabajo dinámico como estático. El trabajo dinámico permite la locomoción y el posicionamiento de los segmentos corporales en el espacio. El trabajo estático, mantiene la postura o la posición del cuerpo. La unidad del músculo esquelético es la fibra muscular, una célula cilíndrica alargada con muchos cientos de núcleos. Una fibra muscular se constituye de muchas miofibrillas las cuales están recubiertas por una delicada membrana plasmática llamada sarcolema. La miofibrilla está constituida por varias sarcómeras que contienen filamentos delgados (actina), gruesos (miosina), elásticos (titina) e inelásticos (nebulina). Las miofibrillas son la unidad básica de la contracción.

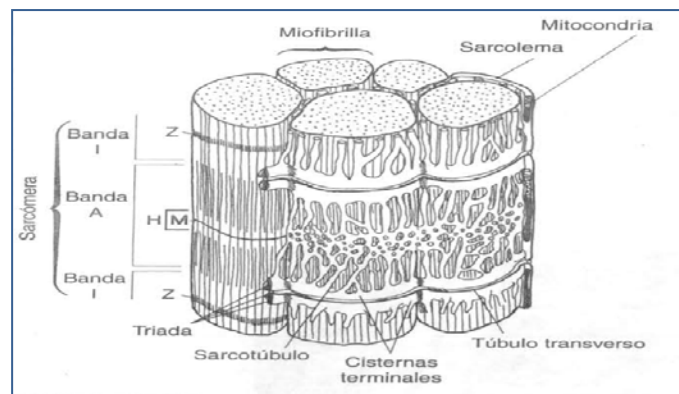
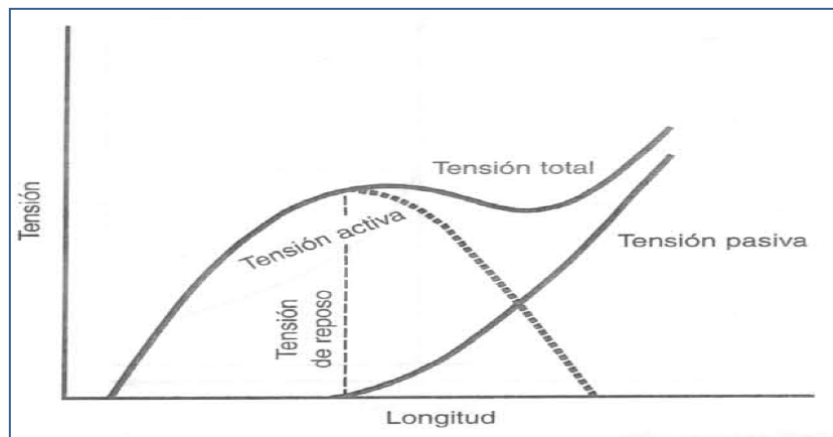


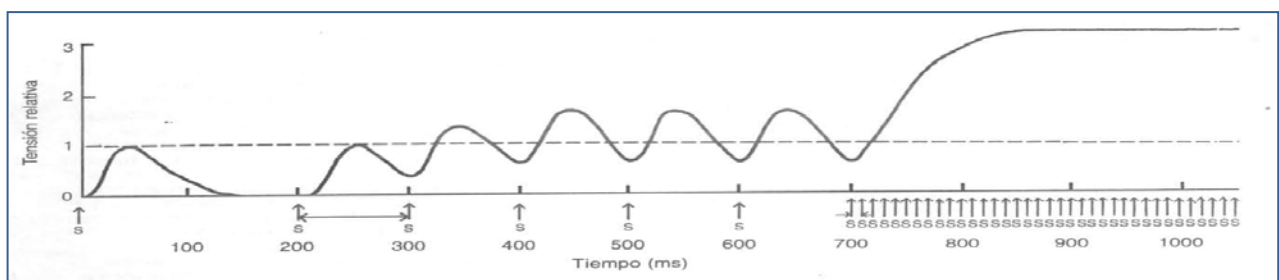
Figura 4 Composición fibra músculo

La fuerza total que un músculo puede producir está influenciada por sus propiedades mecánicas que pueden describirse mediante la valoración de las relaciones de tensión-longitud, carga-velocidad, y fuerza-tiempo del músculo y de la arquitectura muscular esquelética. Otros factores principales en la producción de fuerza son la temperatura del músculo, la fatiga del músculo y el preestiramiento.



Relación tensión-longitud

La tensión activa y pasiva ejercida por el músculo completo contrayéndose isométrica y técnicamente se representa en relación a la longitud muscular. La tensión activa se produce por los componentes contráctiles del músculo y la tensión pasiva por los componentes elásticos en serie y en paralelo, los cuales desarrollan la sollicitación cuando el músculo se estira más allá de su longitud de reposo. Cuanto mayor es la cantidad de estiramiento, más grande es la contribución del componente elástico a la tensión total. La forma de la curva activa generalmente es la misma en diferentes músculos, pero la curva pasiva, y de ahí la curva total, varía dependiendo de cuánto tejido conectivo (componente elástico) contiene el músculo.



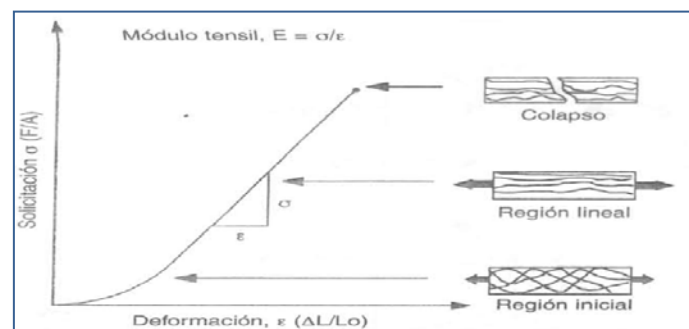
Generación de la tetanización muscular

Cuando la frecuencia de estimulación (E) incrementa (por ejemplo, los intervalos se acortan de 200 a 100 ms), la tensión muscular aumenta como un resultado de la sumación. Cuando la frecuencia se incrementa a 100/segundo, la sumación llega a ser máxima y el músculo se contrae típicamente, ejerciendo un pico de tensión mantenido.

Biomecánica del cartílago articular

Existen tres tipos de articulaciones en el cuerpo humano: fibrosas, cartilaginosas y sinoviales. Sólo una de estas, las sinoviales o diartrodias, permiten un gran rango de movimiento. La función del cartílago articular en las articulaciones diartrodias es incrementar el área de distribución de carga (por lo tanto reduciendo la sollicitación) y proporcionar una superficie de soporte lisa y resistente al desgaste.

El cartílago debería verse como un material multifásico. En términos de un material bifásico, el cartílago articular se compone de una matriz sólida de colágeno PG porosa- permeable (aproximadamente el 25 % del peso hidratado) rellena por el fluido intersticial libremente móvil (aproximadamente el 75 % del peso hidratado). Además de la sólida y la fluida, existe una fase iónica adicional cuando se considera el cartílago articular como un medio trifásico. La fase iónica es necesaria para describir la tumefacción y otros comportamientos electromecánicos del tejido.



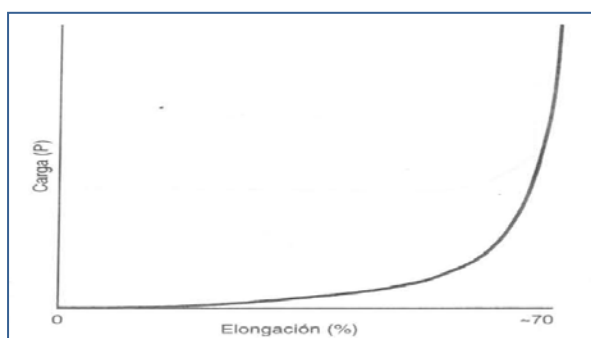
Curva de sollicitación-deformación

En esta curva de sollicitación-deformación tensil típica para un cartílago articular, los dibujos de la derecha muestran la configuración de las fibrillas de colágeno a varios estadios de carga. En la región inicial se produce la tensión de la fibrilla de colágeno a medida que las fibrillas se alinean en la dirección de la carga tensil. En la región lineal, las fibras de colágeno alineadas se estiran hasta que se produce el colapso.

Biomecánica de los tendones y ligamentos

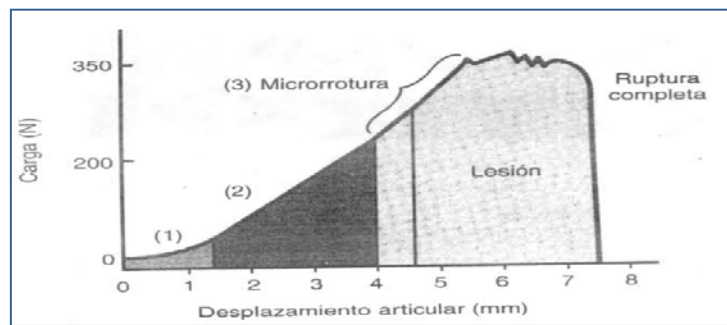
Las tres estructuras principales que rodean íntimamente, conectan y estabilizan las articulaciones del sistema esquelético son los tendones, ligamentos y cápsulas articulares. Aunque estas estructuras son pasivas, cada una desempeña un papel esencial en el movimiento articular. El rol de los ligamentos y cápsulas articulares, que conectan un hueso con otro hueso, es aumentar la estabilidad mecánica de las articulaciones, guiar el movimiento articular y evitar el movimiento excesivo. Los ligamentos y las cápsulas articulares actúan como limitadores elásticos. La función de los tendones es insertar el músculo al hueso y transmitir las cargas tensiles de aquél a éste, produciendo así movimiento articular o manteniendo la postura corporal. Los tendones y los músculos forman la unión músculo-tendón, que actúa como un limitador mecánico. El tendón también capacita al cuerpo muscular para mantenerse a una distancia óptima de la articulación sobre la que actúa sin requerir una excesiva longitud del músculo entre el origen y la inserción.

Los tendones y ligamentos son estructuras viscoelásticas con propiedades mecánicas únicas. Los tendones son lo suficientemente fuertes como para soportar las elevadas fuerzas tensiles que resultan de la contracción muscular durante el movimiento articular, aunque son suficientemente flexibles para angularse alrededor de las superficies óseas y desviarse por debajo de los retináculos para cambiar la dirección final de la tracción muscular. Los ligamentos son plegables y flexibles, permitiendo los movimientos naturales de los huesos a los que se insertan, pero son fuertes e inextensibles como para ofrecer una resistencia adecuada a las fuerzas aplicadas.



Carga-elongación de ligamento

Esta curva representa la relación entre carga y elongación de un ligamento amarillo humano (60-70 % de fibras elásticas) testado en tensión hasta el colapso. Al 70 % de elongación, el ligamento un gran incremento de la rigidez con carga adicional y colapsó bruscamente si más deformación.



Carga-desplazamiento de ligamento

Esta curva de carga-desplazamiento de un test de tensión de un ligamento cruzado anterior humano se ha dividido en tres regiones correlacionadas con hallazgos clínicos: (1) la carga impuesta en el ligamento anterior durante el test de cajón anterior; (2) la que se situaba en el ligamento durante una actividad fisiológica; y (3) la que se impone en el ligamento desde el daño parcial hasta la ruptura completa. Debería decirse que las divisiones mostradas aquí representan una generalización. La microrrotura parece empezar hacia el final de la región de carga fisiológica, pero esto debería tener lugar bastante antes de este punto en cualquier ligamento dado.

Biomecánica del sistema nervioso

El sistema nervioso funciona como el centro de control de la red de comunicaciones del cuerpo. Por lo tanto, tiene tres papeles principales: siente los cambios en el cuerpo y en el ambiente externo, interpreta estos cambios y responde a esta interpretación iniciando una acción en forma de contracción muscular o secreción glandular.

Con fines descriptivos, el sistema nervioso puede dividirse en dos: el sistema nervioso central, constituido por el cerebro y la médula espinal, y el sistema nervioso periférico compuesto por varios nervios que tienen origen en el cerebro y la médula espinal.

2.1.1.3 Decisión segregación elementos

Tras haber estudiado la concepción anatómica y biomecánica del cuerpo humano, en este apartado se decidirá en qué segmentos dividir el cuerpo y las simplificaciones que llevará implícitas el modelo elegido

Ubicación de referencias

Para la determinación de la ubicación de un segmento son imprescindibles, como mínimo, dos puntos que definan el vector posición de su eje longitudinal, los cuales habitualmente, se corresponden con los extremos del eje longitudinal. La localización de estos puntos puede determinarse a partir de puntos anatómicamente conocidos ya sean de tipo interno (centros de rotación articular, puntos topológicos óseos, etc), como epidérmicos o superficiales (protuberancias, puntos característicos de la piel, etc). (Soto, 1996)

La mayor parte de los segmentos corporales en los que habitualmente se segmenta el cuerpo humano desde el punto de vista biomecánico, suelen tener propiedades no deformables, son rígidos. En el caso de algunos segmentos (pantorrilla, muslo, brazo, antebrazo y cráneo) el planteamiento de la rigidez puede ser aceptado partiendo de la base anatómica de que las distancias óseas de los citados segmentos son prácticamente invariables.

Por tanto, para la elección del informe o modelo estadístico que será la fuente de las dimensiones de los segmentos, debemos encontrar aquel que **identifique claramente los límites de los segmentos de la manera propuesta en los párrafos anteriores**, con preferencia los que hagan relación a puntos epidérmicos o superficiales, ya que facilitarán el reconocimiento, y del modelado por tanto.

Adicionalmente, consideraremos los segmentos rígidos

Enfoque biomecánico: cinemática

Se toma la decisión de aproximarnos a la versión del cuerpo humano que propone la biomecánica, en concreto, una concepción mecanicista que considera el cuerpo humano como un sistema formado por una serie de segmentos sobre los cuales actúan fuerzas externas e internas.

Dicha concepción puede ser traducida mediante dos tipos básicos de enfoques (Vera, Técnicas de análisis en biomecánica deportiva: estado actual y perspectivas, 1989), planteando cada uno de ellos un modo diferente de concebir el comportamiento corporal: El primer enfoque se basa en considerar al cuerpo humano como un sistema formado por segmentos rígidos articulados. No tiene en cuenta las deformaciones de los materiales; el segundo enfoque alternativo considera que los segmentos corporales se deforman ante las cargas mecánicas aplicadas.

Eligiendo el primer enfoque: “Actualmente, tanto para el análisis cinemático como para el cinético, se utiliza casi de forma generalizada el modelo de segmentos rígidos articulados (al menos el 99% de los trabajos publicados en Biomecánica Deportiva, según Vera et al., 1987)” (Soto, 1996), se define sus características:

- Basado fundamentalmente en el análisis cinemático del cuerpo humano
- Considera los segmentos como elementos rígidos, articulados e indeformables
- Articulaciones puntuales (localizadas en un punto fijo)

Número de segmentos:

Se puede considerar la tendencia habitual segmentar en 14 segmentos (Soto, 1996). En la siguiente figura se pueden apreciar tanto los segmentos como los puntos anatómicos de referencia:

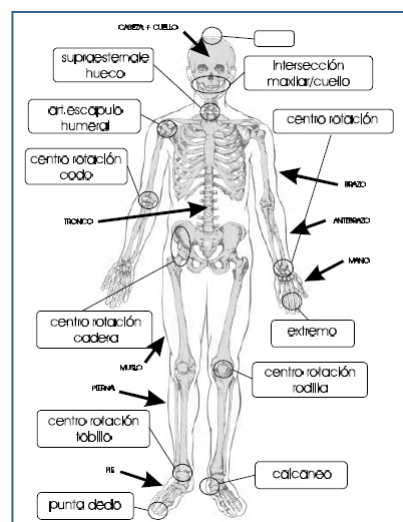


Ilustración 5 División segmentos y articulaciones

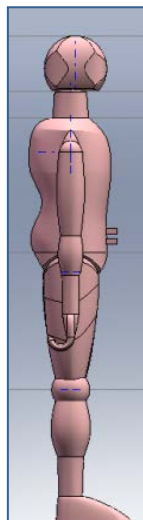
Como decisión final del número de segmentos, se elige **quince segmentos (los catorce propuestos más el cuello)**, por varias razones:

- a) Es una mejora sobre la tendencia habitual.
- b) El cuello nos permite varios grados de libertad sobre la cabeza, que es un elemento con gran densidad y en el extremo del cuerpo, con lo que su variación de posición no es despreciable sobre el CdG.
- c) No empeora el modelo usado como referencia de la moto de radiocontrol.
- d) Son los propuestos desde el lanzamiento del Proyecto por el tutor

En resumen:

- Se debe encontrar un modelo con puntos de referencia de segmentos lo más fácilmente identificables y representativos.
- Se considerarán 15 segmentos.
- Se considerarán los segmentos como elementos rígidos, articulados e indeformables.
- Cada segmento tendrá su propia densidad y será uniforme.
- Articulaciones puntuales (localizadas en un punto fijo).
- Primarán las dimensiones sobre la morfología aparente, esto es, el segmento modelado debe plegarse lo más firmemente a los estudios que se toman como referencia.

Adelantando fases, podemos mostrar cómo se define el modelo de segmentación.



2.1.1.4 Búsqueda modelo representativo: dimensiones y densidad

Una vez está determinado el modelo al que se quería llegar se buscaba que:

- Determinase puntos de referencia de segmentos lo más fácilmente identificables y representativos.
- Proporcionase información de cada uno de los quince segmentos, de dimensiones y pesos.

Adicionalmente, para considerarlo totalmente representativo, también debe

- Estar basado en un espacio muestral suficientemente amplio
- Poseer confiabilidad estadística

Satisfaciendo todo lo expuesto, se encontraron las siguientes fuentes:

- a) Datos antropométricos de la población laboral española. Informe de resultados (Antonio Carmona Benjumea. CNMP Sevilla. INSHT) → Masa total, altura total y longitud de cada segmento.
 - Datos obtenidos entre 1991 y 1996 de 1723 individuos
 - Las medidas presentan una distribución normal
 - Se toma como medida de referencia la media (~ percentil P50)
 - La medida de altura total (1698,84 mm) y la masa corporal (75,67 kg) se consideraron adecuadas para el objetivo del estudio, al tratar de representar un piloto, que no suelen presentar medidas muy altas
- b) Dentro del trabajo Parámetros inerciales para el modelado biomecánico del cuerpo humano (Soto, V.M. y Gutiérrez, M. Facultad de Ciencias de la actividad. Física y del Deporte. Universidad de Granada), se eligen los Parámetros inerciales aportados por de Leva (1996), adaptados de los datos de Zatsiorsky y Seluyanov (1985), utilizando los datos antropométricos del ejército americano de los EEUU del año 1988 y los centros articulares de Chandler et al.(1975). En concreto, los de la muestra masculina.

| SEGMENTO | MASA | CG | pt.proximal | pt.distal |
|-------------------------------|--------|--------|---------------|------------------------|
| cabeza y cuello (head & neck) | 6.94% | 40.27% | gonion medio | vertex |
| tronco (trunk) | 43.46% | 43.78% | supraesternal | cadera media |
| brazo (upper arm) | 2.71% | 49.81% | art.hombro | art.codo |
| antebrazo (forearm) | 1.62% | 45.15% | art.codo | art.muñeca |
| mano (hand) | 0.61% | 78.72% | art.muñeca | 3° metacarpiano |
| muslo (thigh) | 14.17% | 42.41% | art.cadera | art.rodilla |
| pantorrilla (calf, shank) | 4.33% | 45.54% | art.rodilla | art.tobillo (sphyrion) |
| pie (foot) | 1.37% | 44.15% | talón | dedo 1° |
| cabeza y cuello (head & neck) | 6.94% | 49.05% | mentón | vertex |
| tronco (trunk) | 43.46% | 51.53% | cervicale | cadera media |
| antebrazo (forearm) | 1.62% | 45.61% | art.codo | stylium |
| mano (hand) | 0.61% | 79.45% | stylium | 3° metacarpiano |
| muslo (thigh) | 4.33% | 44.88% | art.rodilla | maleolo lateral |

Tabla 2 Pesos de segmentos

- c) Otros datos: Cuando no ha sido posible encontrar una medida directa o derivada de las fuentes previamente citadas, se ha tomado como medida válida la medida en el propio cuerpo del autor del Proyecto, aplicando factor de proporcionalidad partiendo de la relación de estaturas.

La medida se ha repetido 3 veces y la media resultante ha sido el dato a usar

Se han realizado con una cinta métrica con error $\pm 0,5$ cm

2.2 Segmentos del modelo

En este apartado, se describirá el proceso abreviado de modelado de cada segmento y las decisiones relevantes tomadas para cada diseño.

Se ha tratado de trabajar primeramente con medidas directas, y en caso de no haber una disponible, se opta por relacionar dos existentes (a menudo resta de dos referencias). Sólo como último caso se ha optado por medidas propias del autor.

Se ha priorizado las dimensiones sobre la morfología de cada modelado, por lo que en ocasiones, a simple vista los segmentos pueden resultar parcialmente desproporcionados, pero siempre guardan coherencia con el modelo de referencia.

Los segmentos han sufrido procesos de remodelados, cuando tras ensamblar todos ellos, no se garantizaba algún parámetro (como la altura), y deben por tanto, entenderse como un todo.

2.2.1 Segmento #1: Cabeza

Las medidas de las que disponemos son las siguientes:

La medida de altura es una medida derivada, que se deduce de las siguientes directas:

- Estatura (altura del cuerpo)=1698,84mm.
- Altura de los hombros=1414,6mm.

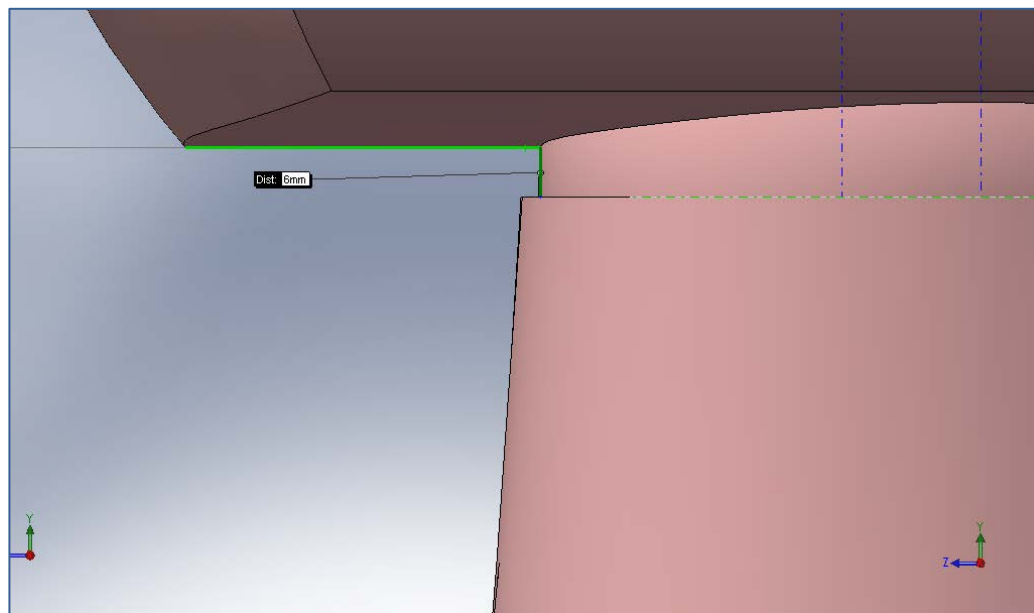
Por tanto, el conjunto cuello + cabeza: $1698,84 - 1414,6 = 284,24$ mm.

Al no disponer de un dato segregado del cuello y la cabeza, se toma como hipótesis de diseño una relación aproximada 70/30 (cabeza-cuello).

La solución es la siguiente: cabeza 190,5 mm y cuello 87,5mm, totalizando 277,5 que sumados a los 6 mm resultantes de ensamblar ambos modelos (ver ilustración debajo) =283,5 mm.

- Perímetro de elipse hallado como aproximación con aproximación 2. Error menor del 5%.
- Cabeza + cuello al menos 278 mm sin tener en cuenta “enganche”.
- En realidad, como medida derivada es 284 mm.

Solución: cabeza 190,5 y cuello 87,5=277,5 + los 6 de debajo=283,5 mm.



El resto de medidas son directas:

- Perímetro de la cabeza= 572,63mm.
- Longitud de la cabeza= 190,64mm.
- Anchura de la cabeza=147,09mm.

Para satisfacer estas 3 medidas y ante la imposibilidad de conocer la geometría exacta del modelo estadístico, se tomó la decisión de recurrir a una elipse de revolución truncada,

Objetivo perímetro 572 mm, longitud 190,64 mm y anchura 147,09 mm. Al no poderse satisfacer todas simultáneamente, se ha priorizado el perímetro y la anchura.

Por tanto, para la obtención del perímetro se sigue el cálculo con las dimensiones:

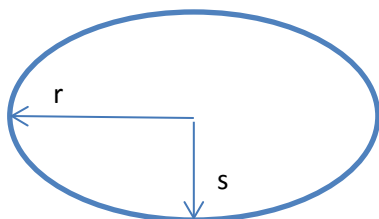
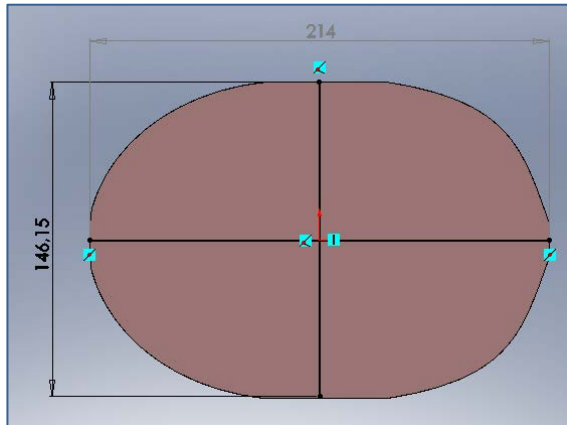


Figura 5 Ejes elipse

Cortando por sección A-A'



Se llega a que

$$Perímetro = \Pi \times \left[3 \times (r + s) - \left[\Pi \times \sqrt{(3 \times (r + s))(r + 3s)} \right] \right]$$

Con $r=14\text{mm}$ y $s=146,15\text{ mm}$, el perímetro=571,95

Se satisfacen por tanto dos de tres medidas propuestas

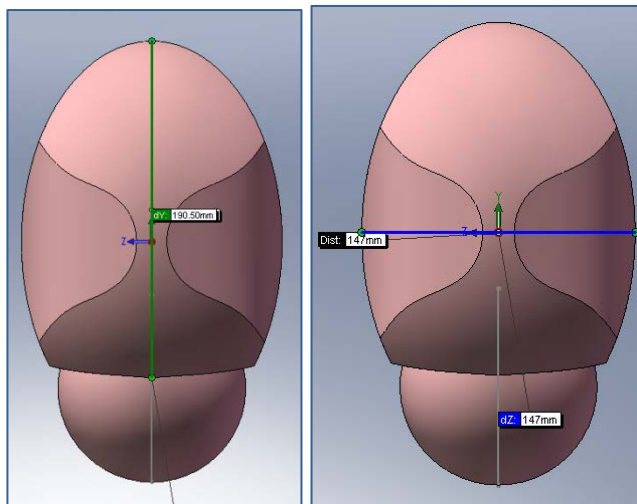
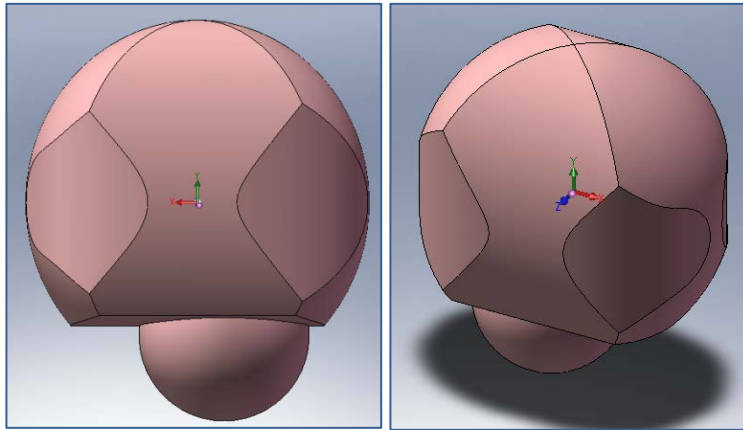
Centro de Gravedad y Masa

Para un cálculo de masa de la cabeza, al no haber una medida directa, se ha usado la hipótesis de que el peso de la cabeza es el 90% del peso del conjunto cabeza, más cuello:

Centro de gravedad y masa:

| Segmento | Porcentaje peso cuerpo | Peso [gr] |
|-------------------------------|---------------------------|-----------|
| Cabeza y cuello (head & neck) | 6,94% | 5251 |
| Cabeza | 6,26% | 4726 |
| Cuello | 0,69% | 472 |

Situándose el centro de gravedad en: (-1.10;-1.81;-0.00)



2.2.2 Segmento #2: Cuello

Según los razonamientos explicados para el segmento “Cabeza”, la medida de longitud es una medida derivada, que se deduce de las siguientes directas:

- Estatura (altura del cuerpo)=1698,84 mm.
- Altura de los hombros=1414,6 mm.
- Por tanto, el conjunto cuello + cabeza:
 $1698,84 - 1414,6 = 284,24$ mm.

Por tanto, el cuello debe medir de longitud 87,5 mm.

Mientras que el perímetro del cuello se usó la siguiente medida directa:

$$P_{\text{cuello}} = 388,53 \text{ mm.}$$

Se considera que dicho perímetro sea el descrito en el plano medio del cuello, por tanto:

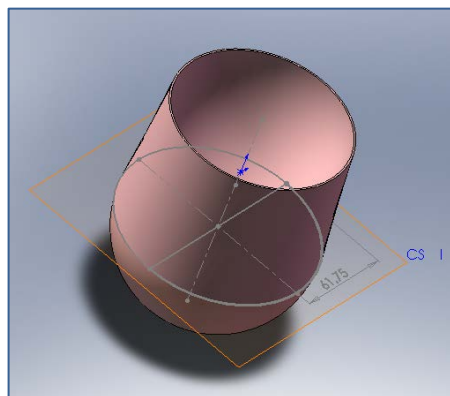
$$P = 2 \times \Pi \times R$$

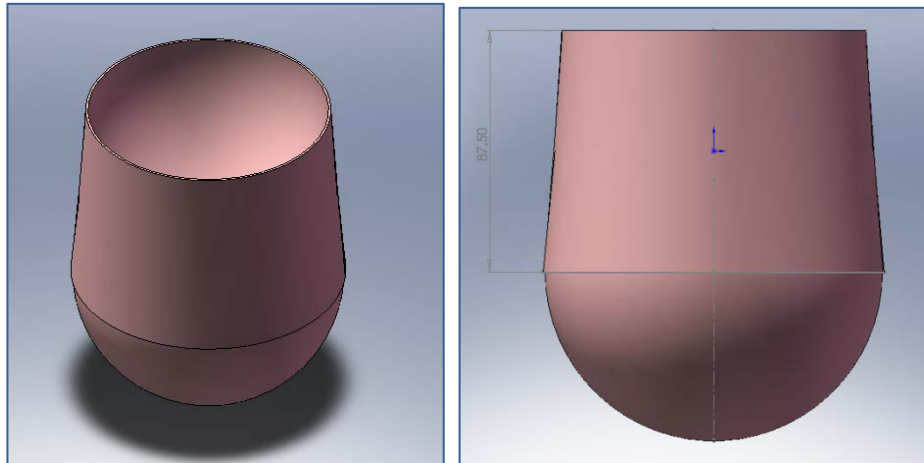
De modo que:

$$R = \frac{P}{2 \times \Pi}$$

$R = 61,8$ mm que se encuentra en el plano inferior (CS I) del modelo (figura 1).

Con esto queda totalmente definido, y morfológicamente, como se ve a continuación:





- Centro de gravedad y masa

| Segmento | Porcentaje peso cuerpo | Peso [gr] |
|----------|------------------------|-----------|
| Cuello | 0,69% | 472 |

Centro de masa (milímetros): (0.00; -37.04;0.00)

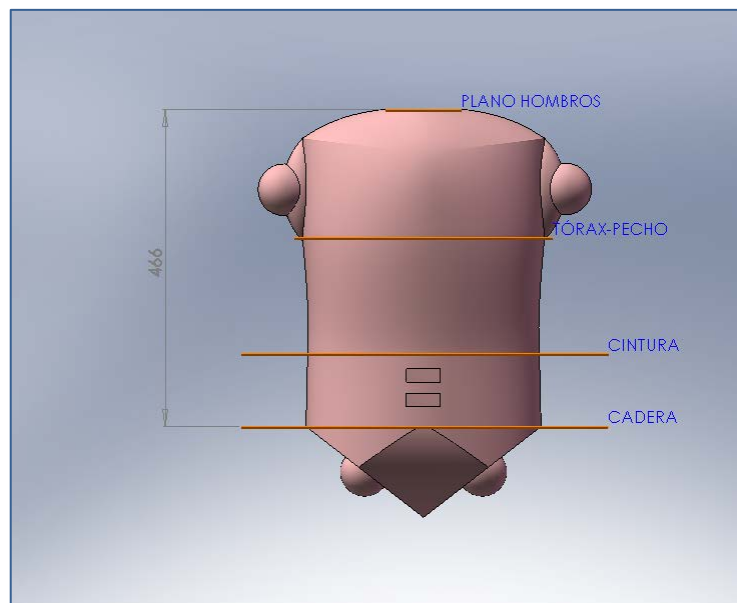
2.2.3 Segmento #3: Torso

Para el modelado, se atendió a las siguientes medidas directas:

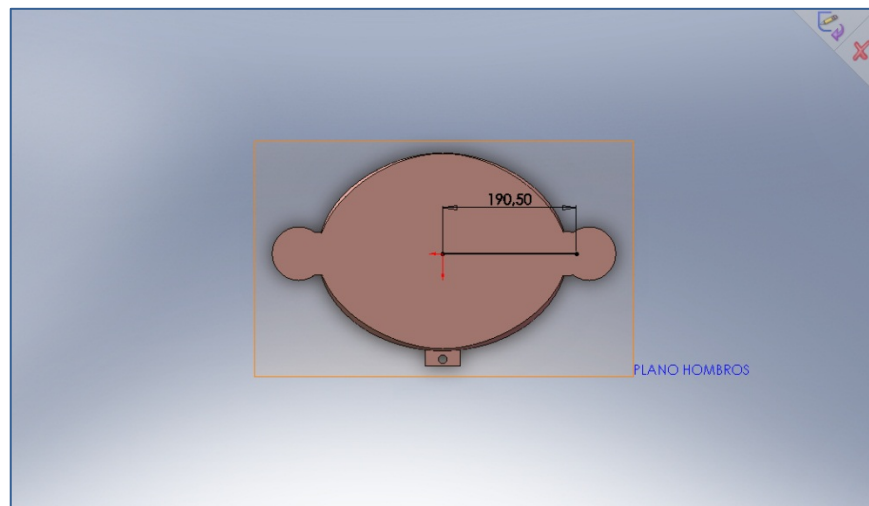
- Altura de los hombros=1414,6 mm.
- Espesor del pecho, de pie=250,95 mm.
- Espesor abdominal, de pie =241,66 mm.
- Anchura de caderas (de pie)= 345,02 mm.
- Anchura de hombros biacromial= 381,37 mm.
- Perímetro torácico, de pie= 994,06 mm.
- Perímetro de cintura, de pie=918,83 mm.
- Altura de la espina ilíaca 948,48 mm.

Como medidas derivadas:

- Altura de los hombros (1414,6 mm)-Altura de la espina ilíaca (948,48)=466,12 mm, que consideraremos desde el plano donde el torso se encuentra con el cuello hasta donde la cadera, determinada por la altura de la espina ilíaca. La llamaremos longitud principal del torso



La anchura de hombros biacromial (381,37 mm) se satisface con estas referencias:

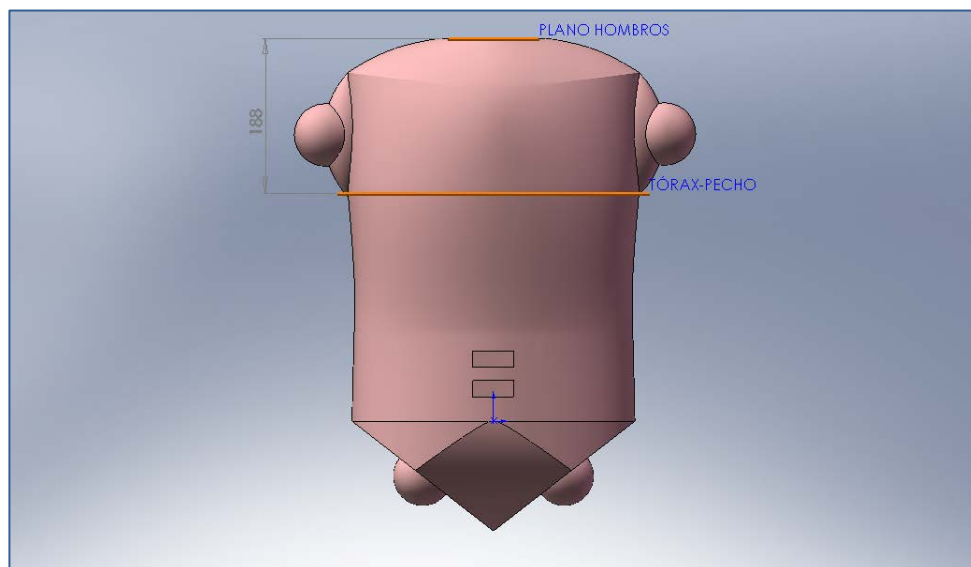


Al no disponer de medidas directas ni derivadas, y ante la necesidad de situar en altura los planos en los que localizar las medidas directas, hemos tomado como modelo las medidas del autor del Proyecto, y aplicando la proporción a la longitud principal del torso (466 mm), tenemos:

a) Hombros-Tórax-Pecho

Representa el 40,5% del torso, por tanto:

$$h_{T\acute{o}rax_pecho} = 466 \times 0,405 = 188,2mm$$



Idealmente se tratará de respetar los tres parámetros que definen:

- Perímetro torácico, de pie= 994,06
- Anchura de pecho=321,35 mm
- Espesor del pecho, de pie= 250,9 mm

Pero al no conocer la forma, se opta por modelar como una elipse, y respetar la excentricidad del modelo original, así como su perímetro:

$$Excentricidad = \frac{r}{s}$$

$$r_{\text{propuesto}} = 160,5 \text{ mm}$$

$$s_{\text{propuesto}} = 125 \text{ mm}$$

Por tanto, Excentricidad= 1,28

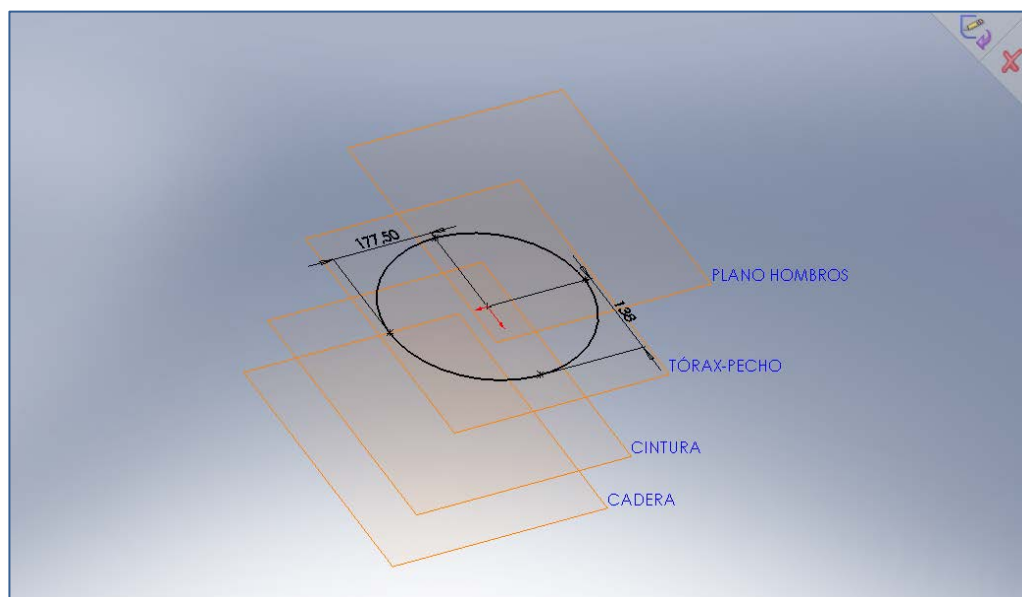
La elipse que lo describe cumple la condición del perímetro calcula con:

$$Perímetro = \Pi \times \left[3 \times (r + s) - \left[\Pi \times \sqrt{(3 \times (r + s)(r + 3s))} \right] \right]$$

$$r = 177,5 \text{ mm} \quad s = 138 \text{ mm}$$

Quedando el perímetro: 995,06 mm

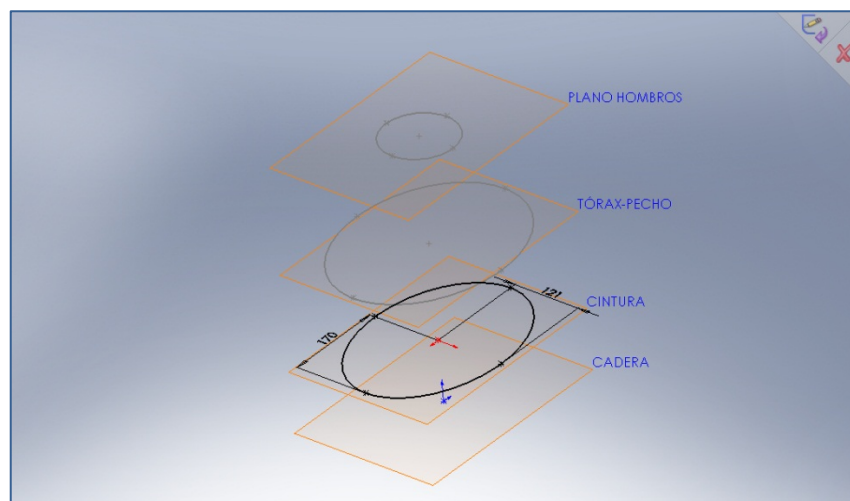
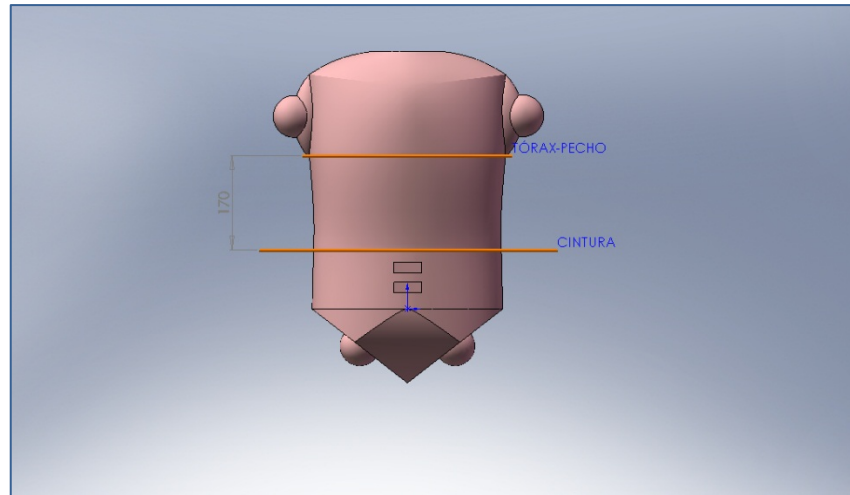
Con excentricidad= 1,28



b) Tórax-Pecho-Cintura

Representa el 36,5% del torso, por tanto:

$$h_{cintura} = 466 \times 0,365 = 170,1mm$$



Idealmente se tratará de respetar los dos parámetros que definen. Son medidas directas:

- Perímetro de cintura, de pie= 918,83 mm.
- Espesor abdominal, de pie=241,66 mm.

De modo que conocido el valor de P y de uno de los dos parámetros que definen la elipse (eje mayor y eje menor), se calcula el valor restante quedando:

- $r=170$ mm.
- $S=121$ mm.

Que satisfacen, que el perímetro, según:

$$\text{Perímetro} = \Pi \times \left[3 \times (r + s) - \left[\Pi \times \sqrt{(3 \times (r + s)(r + 3s))} \right] \right]$$

Quede como $P=919,27$ mm

Y la excentricidad: 1,41

c) Cintura-Cadera

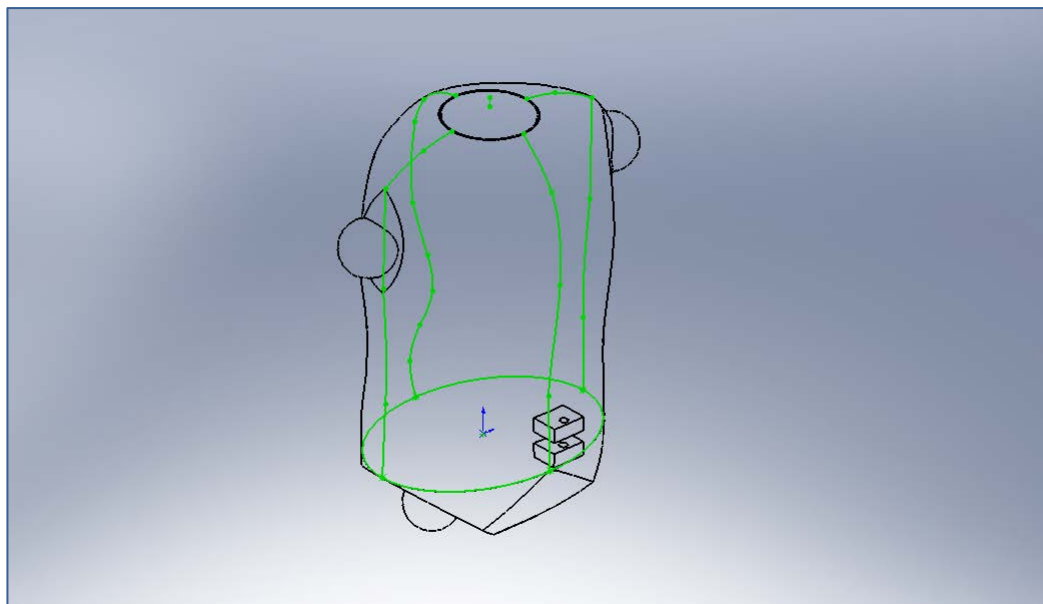
Representa el 23% del torso, por tanto:

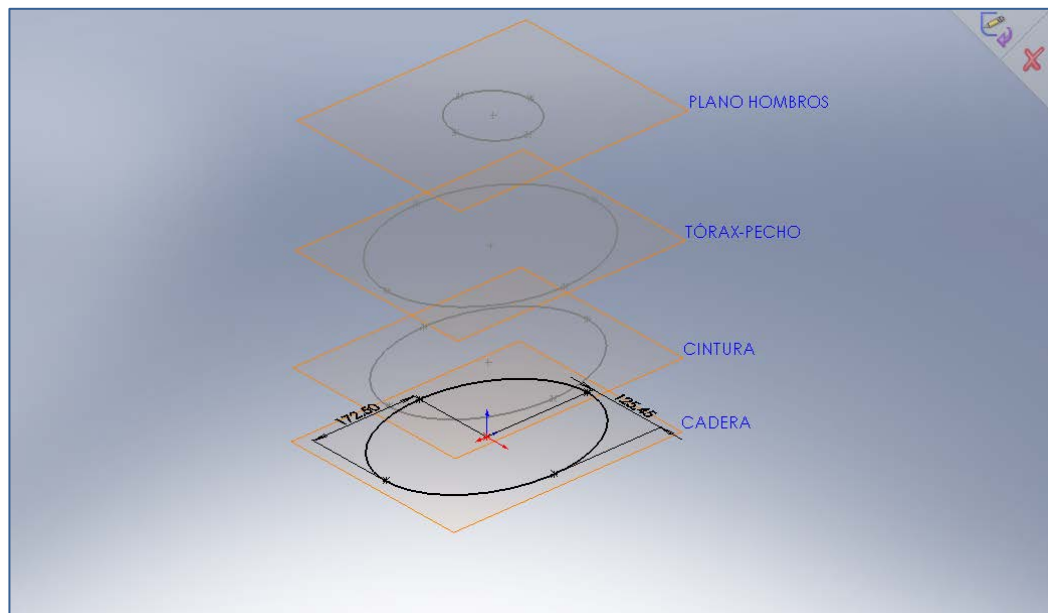
$$h_{\text{cintura}} = 466 \times 0,23 = 107,2 \text{ mm}$$

Construimos la cadera con sólo un dato directo:

Anchura de caderas, de pie: 345,02 mm \rightarrow eje mayor $r=172,5$ mm

De modo que se asimila dicho parámetro como eje mayor de la elipse, “r” y el eje menor “s” se calcula gráficamente para dar continuidad a la silueta del modelo.



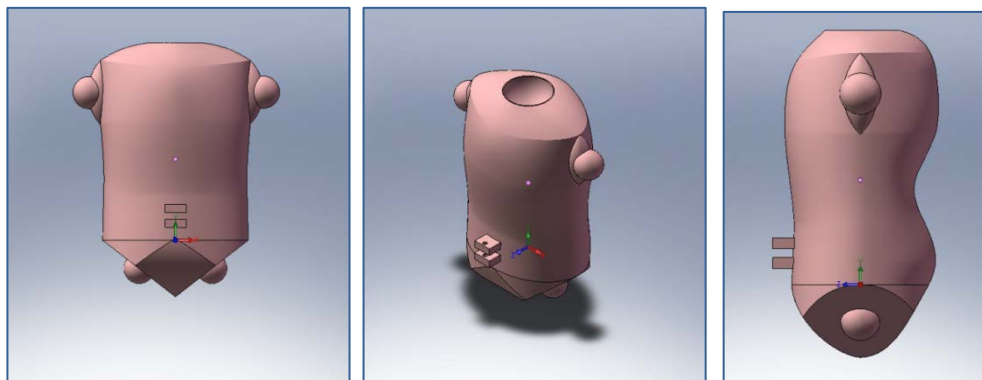


NOTA: El anclaje para el enlace, se diseñó en concurrencia con el ángulo del plano con el que se une al depósito, mediante iteraciones hasta encontrar la postura de pilotaje idónea

- Centro de gravedad y masa

| Segmento | Porcentaje peso cuerpo | Peso [gr] |
|----------|------------------------|-----------|
| Torso | 43,46% | 32886 |

Centro de masa (milímetros): (0.12;191,08;0.24)



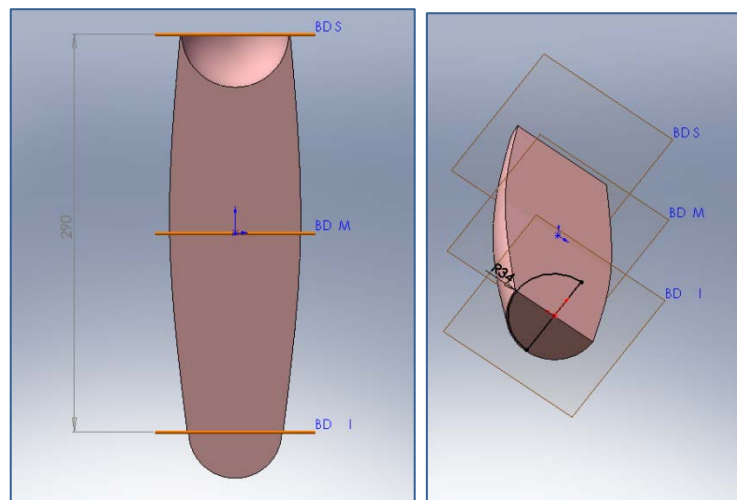
2.2.4 Segmento#4: Brazo izquierdo

Como longitud, sólo disponemos de la medida directa:

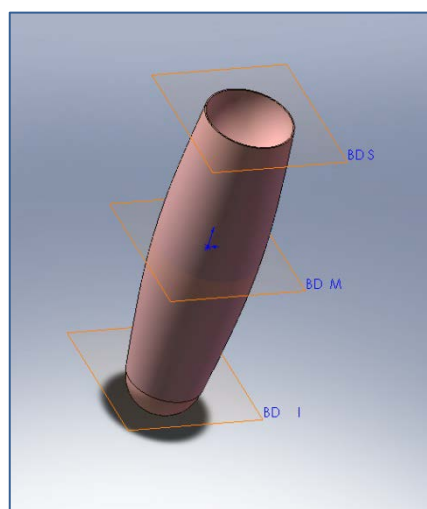
Longitud hombro-codo= 365,05 mm

Tras el ensamblaje completo, se propone una modificación que satisface el desarrollo completo con el antebrazo, dejando la medida definitiva en:

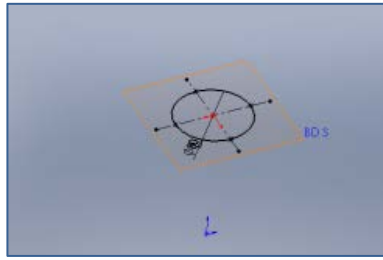
Longitud segmento: $290 + 17 \text{ (revolución en codo)} = 307 \text{ mm}$



Para modelizar este segmento, se definen 3 planos (superior, medio e inferior), donde situar los perímetros correspondientes



El radio de la circunferencia del extremo superior, situado en el plano “BD S” se define con el radio de revolución consecuente con la pieza que debe encajar (torso).



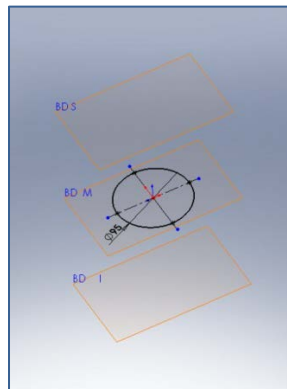
Su valor es $R_{\text{vaciado_hombro}} = 39 \text{ mm}$

Para el cálculo de radio, se usa medida del autor del Proyecto, así:

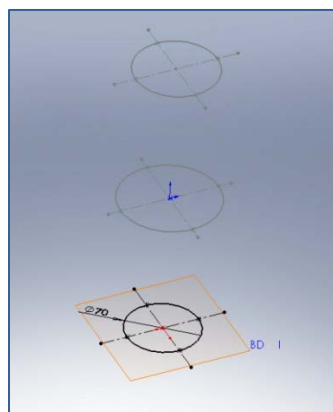
Perímetro en Plano intermedio “BD I”, de pie= 300

$$\text{Con } R = \frac{P}{2 \times \Pi}$$

Se deduce que: $R = 47,75 \text{ mm}$



El radio de la circunferencia del extremo inferior, situado en el plano “BD I” proviene de medida propia, así:



Perímetro en Plano inferior “BD I”, medido en la articulación del codo= 219 mm

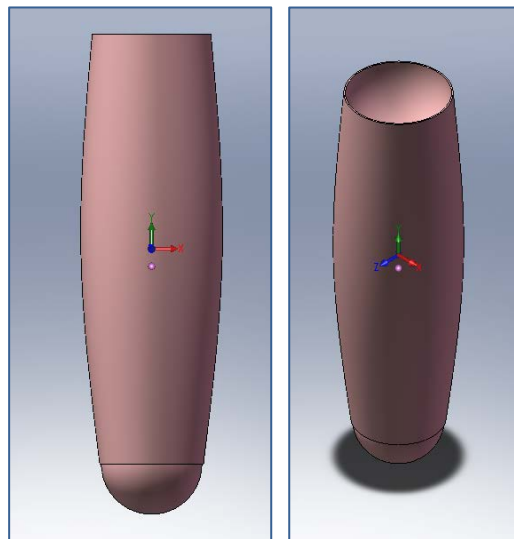
Con el radio de vaciado consecuente con la pieza que debe encajar (mano). Su valor queda: $R_{\text{revolución_codo}} = 35 \text{ mm}$

$$\text{Con } R = \frac{P}{2 \times \Pi}$$

- Centro de gravedad y masa

| Segmento | Porcentaje peso cuerpo | Peso [gr] |
|-----------------|------------------------|-----------|
| Brazo izquierdo | 2,71% | 2050,65 |

Centro de masa (milímetros): (0.00; -11.69;0.00)



2.2.5 Segmento #5: Brazo derecho

Su modelado totalmente análogo al izquierdo, de modo que para los ensamblajes, puede usarse el ya modelado con las mismas características.

2.2.6 Segmento #6: Antebrazo izquierdo

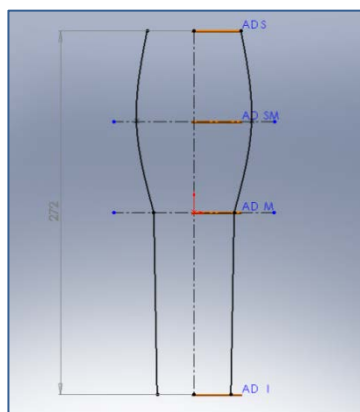
Para el cálculo de la longitud, se dispone de:

Longitud codo-punta de dedos= 460,73 mm

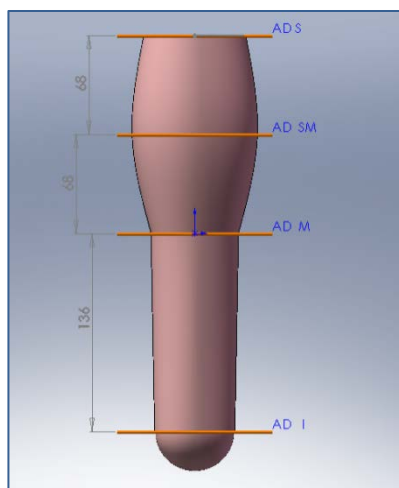
Longitud de la mano= 188,18 mm

De su resta se deduce la longitud del segmento:

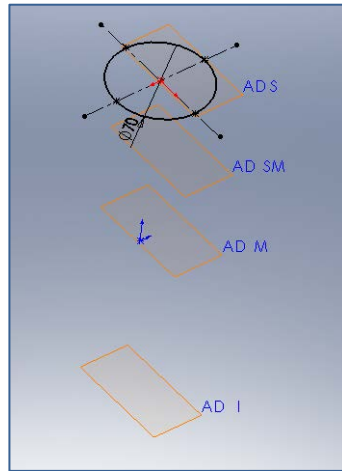
$\text{Longitud}_{\text{antebrazo izquierdo}} = 460,73 - 188,18 = 272,55$



El segmento se ha dividido en 4 planos (superior, superior-medio, medio e inferior), situados como se observa a continuación:

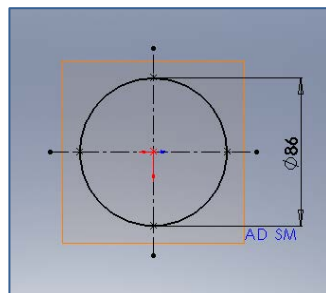


En el plano superior “AD S”



La medida de la articulación del codo, consecuente con la medida de su contraparte en el brazo, siendo $R_{\text{codo}}=35\text{mm}$.

En el plano “AD SM”, situamos la sección máxima, medida sobre el autor del Proyecto, así:

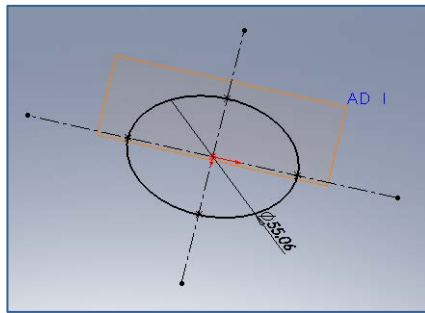


De igual modo, en el plano inferior reside una superficie de revolución con perímetro medido sobre el autor, con:

Perímetro en Plano inferior “BD I”, medido en la articulación del codo= 173 mm

$$\text{Con } R = \frac{P}{2 \times \Pi}$$

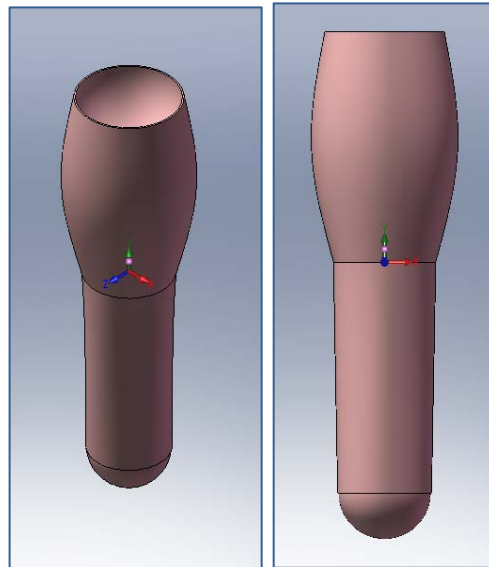
$$R_{\text{muñeca}}=27,5 \text{ mm}$$



- Centro de gravedad y masa

| Segmento | Porcentaje peso cuerpo | Peso [gr] |
|---------------------|------------------------|-----------|
| Antebrazo izquierdo | 1,62% | 1225,85 |

Centro de masa (milímetros): (0.00; 7.70; 0.00)



2.2.7 Segmento #7: Antebrazo derecho

Por simetría, modelado de manera análogo al izquierdo.

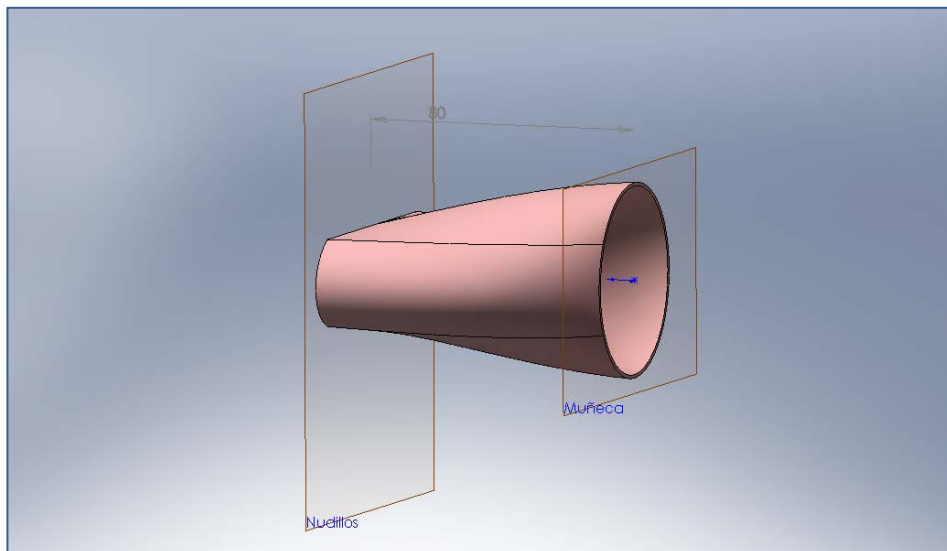
2.2.8 Segmento #8: Mano izquierda

Se dispone de la medida directa:

- Longitud de la mano= 188,18 mm
- Anchura de la palma de la mano= 89,30mm

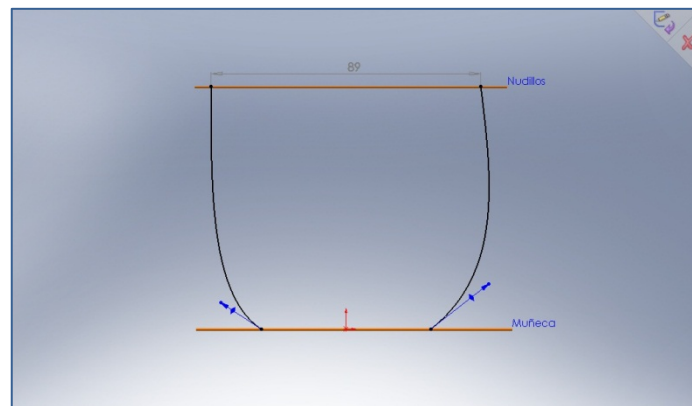
Se toma la decisión de dividir la longitud en dos segmentos, con las medidas tomadas directamente del autor del Proyecto:

- Palma de la mano: 80 mm
- Dedos: 108 mm
- Longitud desde muñeca hasta nudillo del dedo índice=80 mm



Para su anchura, usamos la medida directa.

Anchura de la palma de la mano= 89,30mm



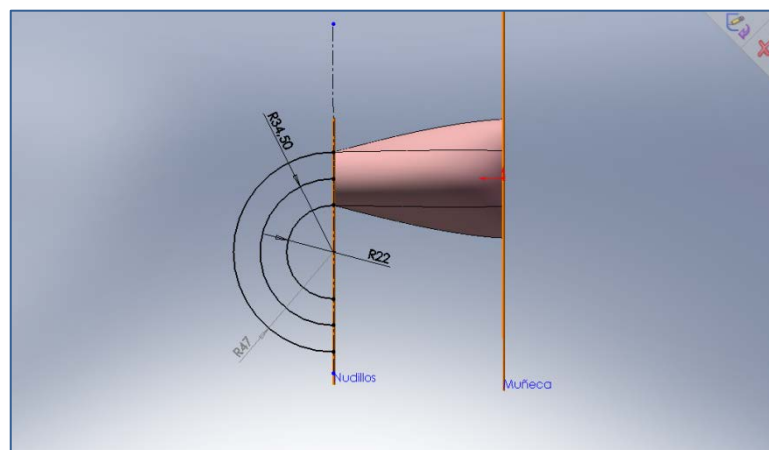
Dedos

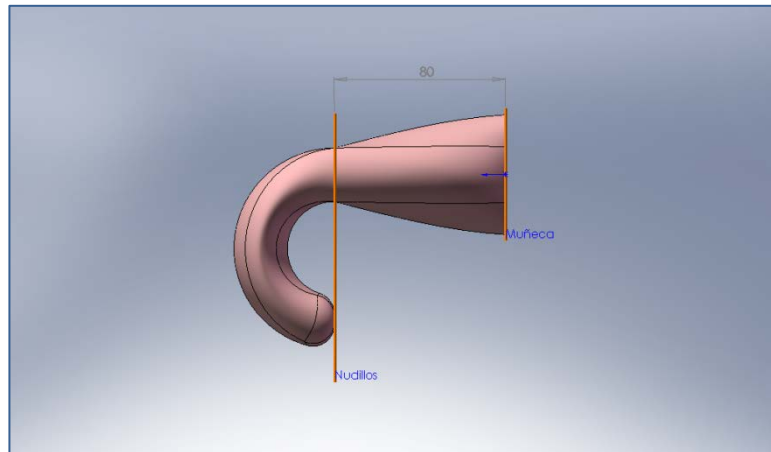
Longitud desde nudillo dedo medio hasta punta=108 mm.

El radio medio de la operación, desarrolla la mitad del perímetro de la circunferencia, es decir:

$$R = \frac{P}{2 \times \Pi} = \frac{108/2}{2 \times \Pi} = 34,5mm$$

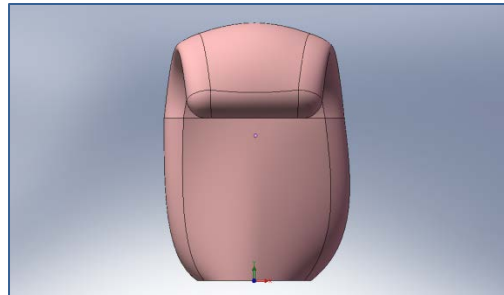
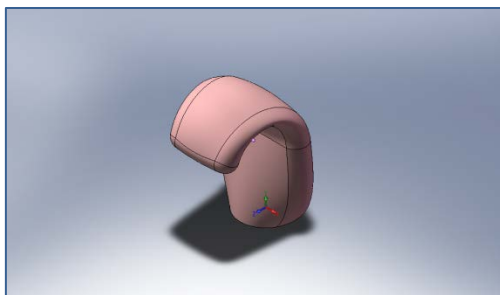
De este modo, conseguimos el resto del desarrollo (108 mm), con una forma adoptada al manillar al cual debe acoplarse.





- Centro de gravedad y masa

| Segmento | Porcentaje peso cuerpo | Peso [gr] |
|---|------------------------|-----------|
| Antebrazo izquierdo | 0,61% | 461,59 gr |
| Centro de masa (milímetros): (0.67; 71.50; 14.57) | | |



2.2.9 Segmento #9: Mano derecha

Por simetría, se modela de manera análoga a la izquierda.

2.2.10 Segmento #10: Muslo izquierdo

Varias notas para el diseño de este segmento:

- Se une en ángulo con el torso.
- Se decide que incluya la rodilla, con lo que su longitud debe entenderse como un todo dentro del subensamblaje muslo-pierna.
- Consideramos espina ilíaca como punto de ensamblaje de los muslos.

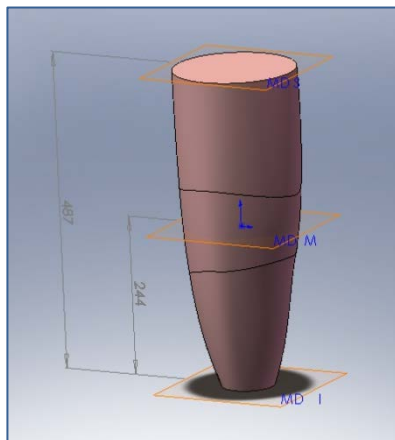
Las anteriores condicionantes dieron lugar a rediseños e iteraciones hasta que le ensamblaje del cuerpo tuvo la altura deseada, que es el objetivo final:

Se hace uso de las siguientes medidas directas:

- Altura de la espina ilíaca= 948,8 mm
- Altura de la tibia= 461 mm
- Espesor del muslo, sentado= 146,55 mm

Se parte, por tanto, de una longitud total que es la resta de la altura de la espina ilíaca en relación a la altura de la tibia, así:

Longitud_{muslo inicial}: $948,8 - 461 = 487$ mm



Se disponen 3 planos, superior, medio e inferior, sobre los que se crearán elipses y circunferencias que guiarán el “recubrimiento”. Sus superficies de referencia son:

En el plano superior; “MD S”, se calculó el mediante iteración para que quedase “enrasado” con su contraparte en el toso.

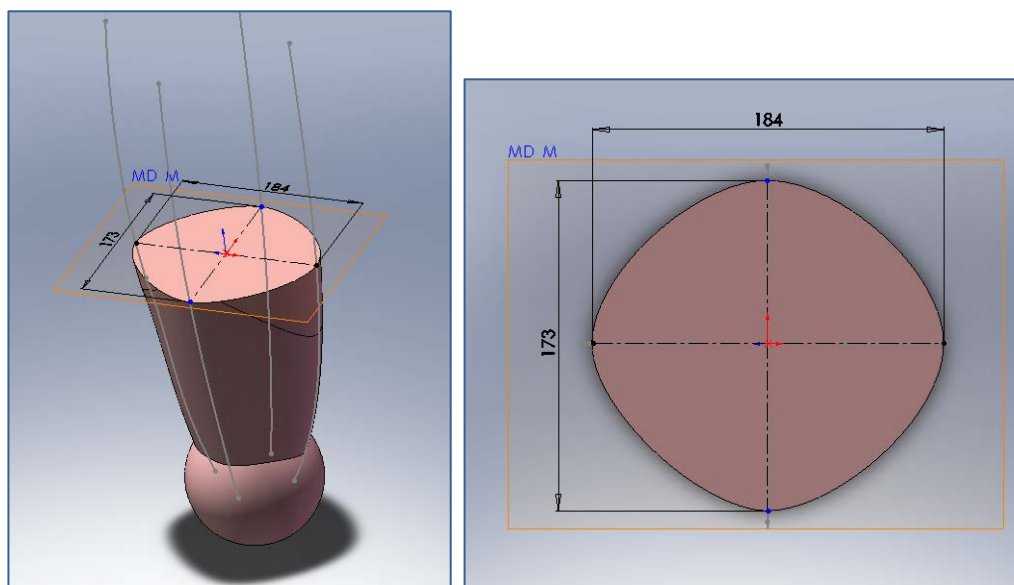
En el plano medio, se desestimó la medida directa del informe de referencia, por hacer relación al muslo sentado, ya que es notable cómo cambia su fisionomía en esta posición en comparación con la de un piloto erguido o en posición de pilotaje.

En su lugar, se trató de garantizar de una parte la continuidad del contorno, y por la otra de satisfacer la medida sobre el autor:

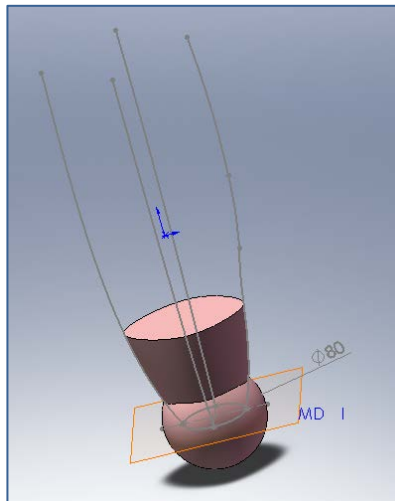
Circunferencia muslo en plano medio, de pie= 560mm

Para ello se creó la superficie que se aprecia en la vista seccionada por el plano medio del muslo “MD M”, que asemejándola a una circunferencia, arroja un perímetro de:

$$Perímetro_{planomedio} = 2 \times \Pi \times R_{medio} = 2 \times \Pi \times \left(\frac{91,8 + 86,4}{2} \right) = 559,83mm$$



Plano inferior: “MD I”. circunferencia de radio 40 mm, que queda oculta por la superficie de revolución posterior que conforma la “rodilla”.

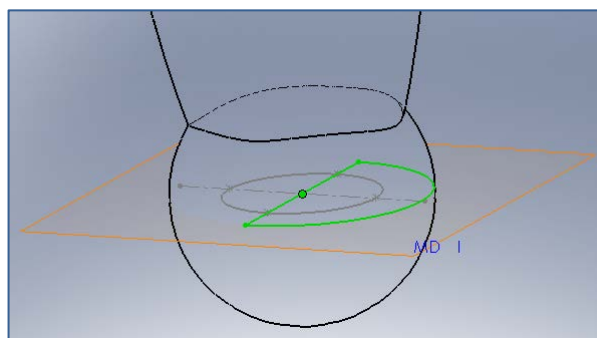
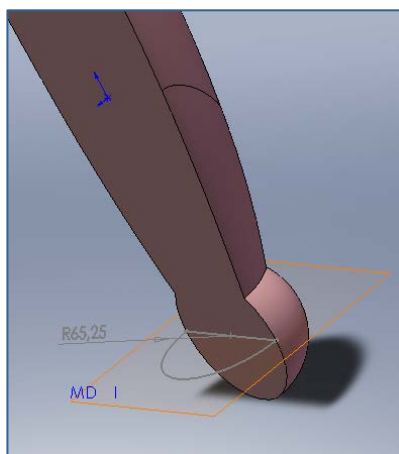


Posteriormente se añade la rodilla revolucionando una esfera que tendría como centro el punto medio del extremo del cuerpo que se presentaba en la imagen anterior, de modo que se añade una longitud ficticia, que en realidad toma coherencia al añadir el segmento “pierna_izquierda”.

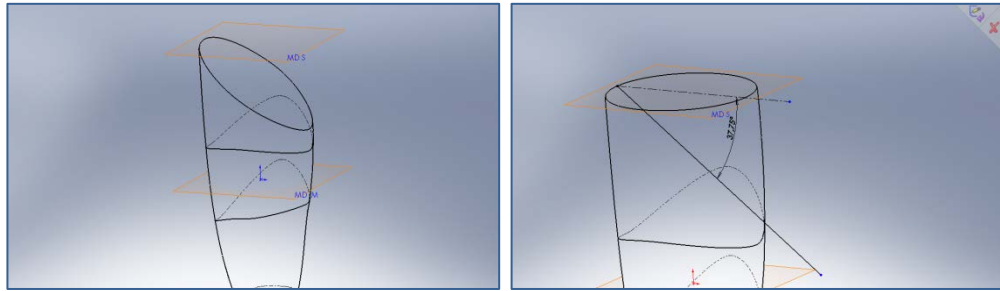
Su radio viene definido por la medida propia:

Perímetro máximo de rodilla=410 mm

$P=2 \times \pi \times R \rightarrow R_{\text{superficie revolución rodilla}}=65,25 \text{ mm}$



Tras lo cual se trabaja el extremo superior con un ángulo coincidente con el que se definió en el extremo inferior del torso ($37,75^0$).



Finalmente se vacía el plano achaflanado superior para asegurar su encaje con el torso, y se redondea, sin afectar a la longitud total del segmento.

- Centro de gravedad y masa

| Segmento | Porcentaje peso cuerpo | Peso [gr] |
|-----------------|------------------------|-----------|
| Muslo izquierdo | 14,17% | 10722,43 |

Siendo el CdG en ejes locales: (-5,58; -19.99; -0.28)

2.2.11 Segmento #11: Muslo derecho

Por simetría, análogo al izquierdo.

2.2.12 Segmento #12: Pierna izquierda

Nos valemos de la medida directa:

Altura de la tibia: 461,96 mm

Esta medida incluye la altura del pie, y al no disponer de la altura del pie, tomamos la medida propia:

Altura del pie para 1780 mm de altura total de individuo → 99,5 mm

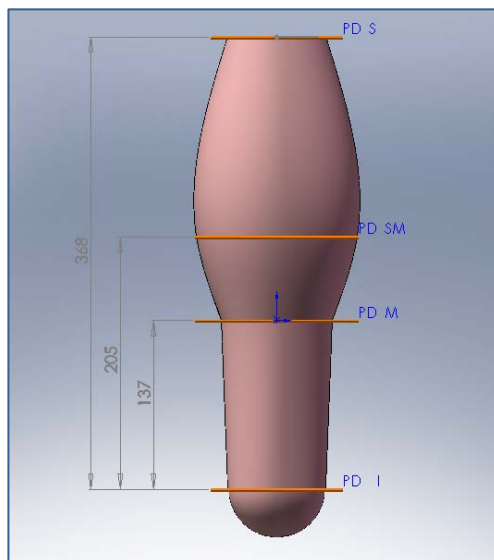
Altura pie para 1698 mm a modelar →

$$Altura_{pie_piloto} = \frac{1698 \times 99,5}{1780} = 94,91mm$$

Por tanto, la altura del segmento “pierna-izquierda” saldrá de la resta de ambos (sin contar el solape por ensamblaje), así:

$$Altura_{pierna_izda} = Altura_{tibia} - Altura_{pie_piloto} = 461,96 - 94,91 = 367,04mm$$

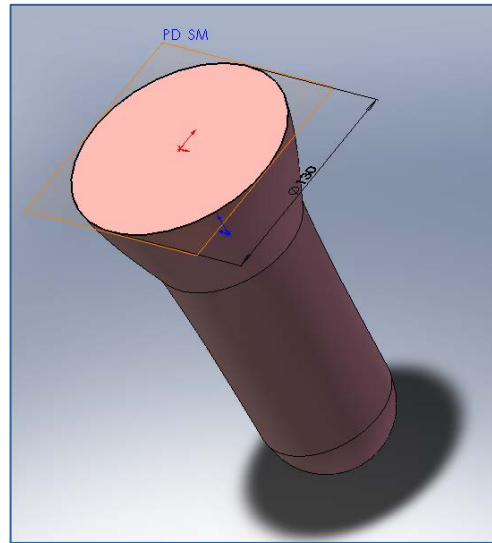
Se disponen planos de referencia situados como se detalla a continuación:



En el PD SM se sitúa la medida hecha sobre el autor, y tras aplicar proporcionalidad como en anteriores ejemplos (sobre altura total):

$$\text{Perímetro}_{PD\ M}=408\text{ mm}$$

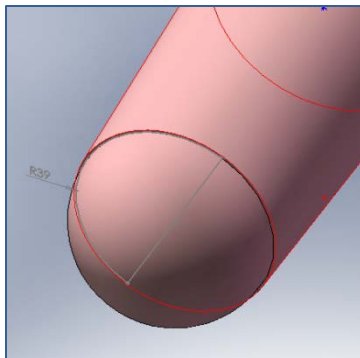
Se satisface mediante el $\text{Radio}_{\text{PDM}} = 65 \text{ mm}$



El perímetro del tobillo se calcula con la medida de dicha articulación en el autor, de este modo y aplicando la proporción:

$\text{Perímetro}_{\text{tobillo}} = 245 \text{ mm}$ de donde

$$\text{Radio}_{\text{tobillo}} = \frac{245}{2 \times \Pi} = 39 \text{ mm}$$



- Centro de gravedad y masa

| Segmento | Porcentaje peso cuerpo | Peso [gr] |
|------------------|------------------------|-----------|
| Pierna izquierda | 4,33% | 3276,51 |

Centro de masa (milímetros): (0.00; 22.56; 0.00)

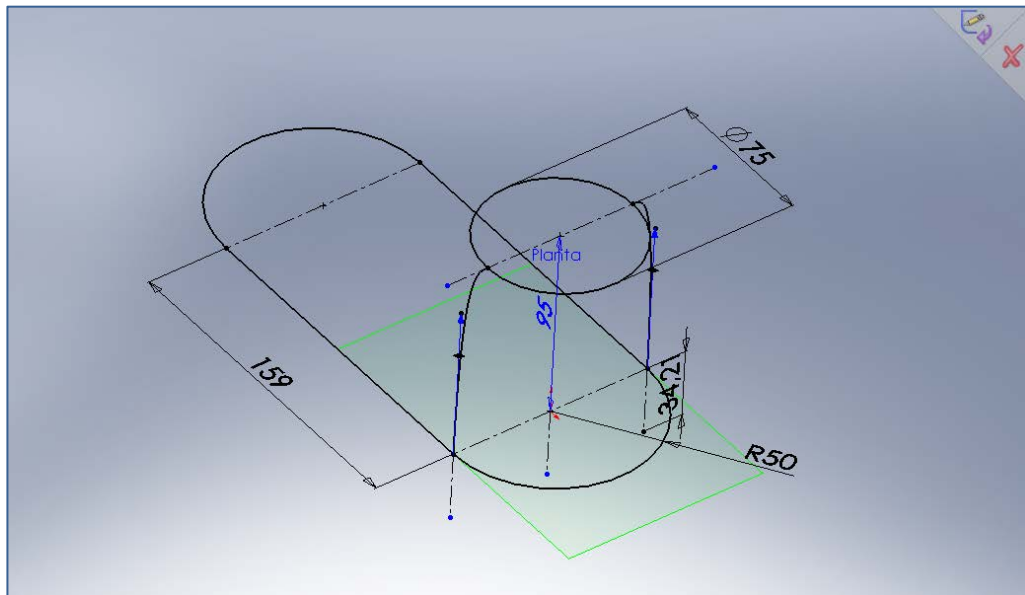
2.2.13 Segmento #13: Pierna derecha

Por simetría, se modela de manera análoga a la pierna izquierda.

2.2.14 Segmento #14: Pie izquierdo

Nos valemos de las siguientes medidas directas:

- Longitud del pie: 259,36 mm
- Y medido sobre el propio autor:
Ancho del pie (de pie) = 100 mm

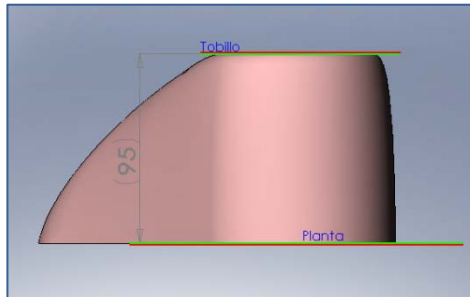


Aplicamos proporcionalidad con el modelo (relación de alturas)

Altura pie para 1698 mm a modelar →

$$Altura_{pie_piloto} = \frac{1698 \times 99,5}{1780} = 94,91mm$$

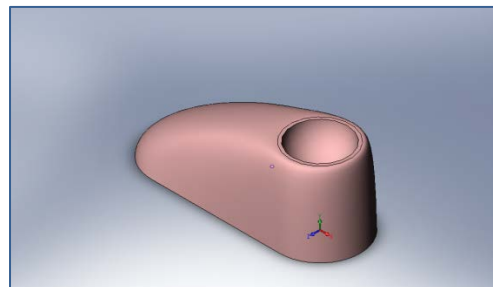
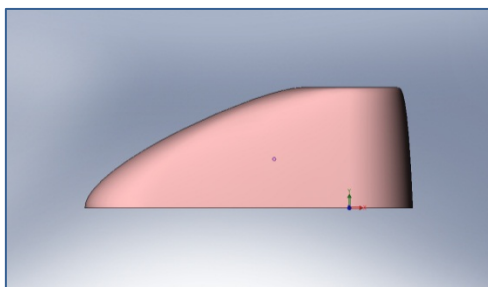
La articulación del tobillo es consecuente con su contraparte de la pierna.



- Centro de gravedad y masa

| Segmento | Porcentaje peso cuerpo | Peso [gr] |
|---------------|------------------------|-----------|
| Pie izquierdo | 1,37% | 1036,68 |

Centro de masa (milímetros): (59,43;38,52;0,00)

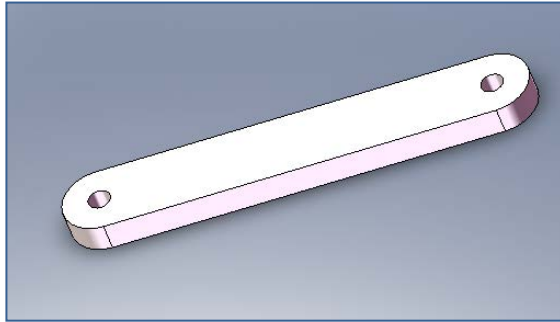


2.2.15 Segmento #15: Pie derecho

De manera análoga al pie izquierdo.

2.2.16 Enlace

Tiene como objetivo unir el depósito con el torso, y su diseño es el fruto de varias iteraciones sobre el ensamblaje completo hasta conseguir el ángulo deseado



Su masa es de 150 gr.

2.3 Ensamblaje

Los segmentos previamente detallados, se disponen en posición erguida quedando:

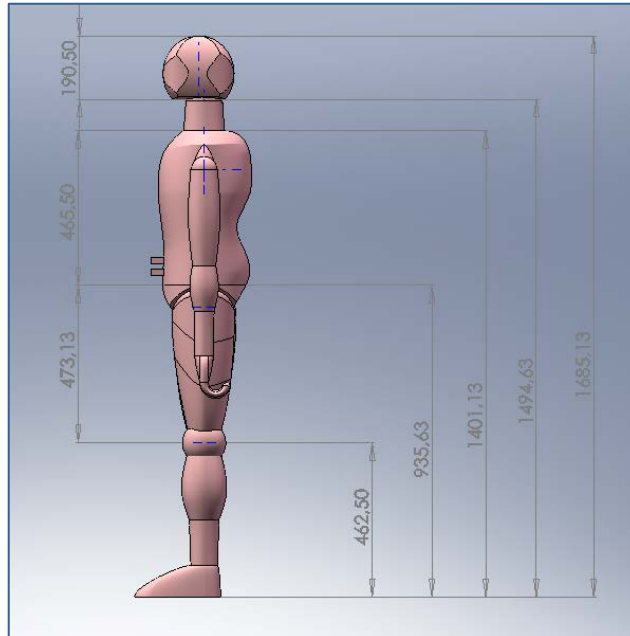


Ilustración 6 Comprobación alturas segmentos

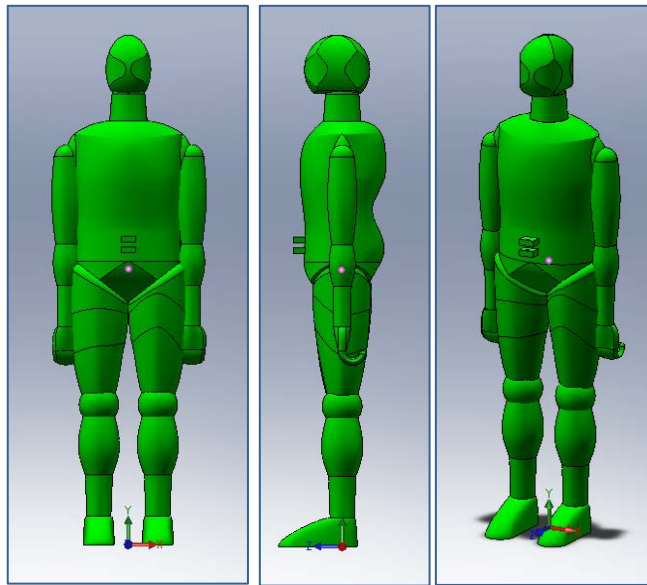
Se construye un sistema de coordenadas simétrico respecto a las piernas y que pasa por el suelo, (“Sistema de coordenadas_suelo”), dando los siguientes datos de salida:

- Centro de gravedad y masa

| Segmento | Porcentaje peso cuerpo | Peso [gr] |
|----------|------------------------|-----------|
| Cuerpo | 100% | 7563 |

Centro de masa (centímetros): (0,02;91,16;0,25)

Obsérvese que el modelo es en la práctica simétrico respecto de dos ejes, y que su CdG se sitúa hacia el ombligo, referencia que valida el modelo dimensionalmente.



El error en estatura cometido es 1685,13 mm frente a 1698,84, que representa un **0,8% de error.**

El error en peso cometido es 75,57 kgs frente a 75.63, que representa un error < **0,1%.**

2.4 Comprobación de representatividad del modelo → Dotación de movimiento

Se presenta a continuación, como evidencia de cumplimiento del sub-objetivo de comprobación de representatividad del modelo, una simulación en la que el protagonismo recae sobre el movimiento del piloto, la viabilidad del mismo y los inputs que son necesarios proporcionarles a la herramienta. Por tanto, se obviará lo referente al modelo de la motocicleta, por ser considerado un mero soporte para nuestros objetivos. Esto implica que su ensamblaje y subensamblajes pueden ser considerados, bien piezas del suelo (“ground parts”), bien estar fijos al propio suelo.

Reseñar que al modelo original de la moto, como se comentó anteriormente, le fue añadido estriberas con ángulo adecuado para apoyar pie, manillar, y el depósito se modificó para albergar una bisagra sobre la que rotar el enlace que une la moto con el torso.

Se considerará representativo el modelo en el caso de que se mueva de modo coherente y su CDG varíe en las direcciones deseadas (hacia el centro de la curva, tanto en altura como en radio).

Para todo ello se usará el módulo “Cosmos Motion”, y partiendo de una postura representativa, se usarán las siguientes relaciones entre elementos dinámicos:

2.4.1 Tabla de relación entre elementos

Cada par simétrico (piernas, brazos), es mostrado en la tabla sólo una vez:
















| ELEMENTO 1 | ELEMENTO 2 | JUNTA | IMÁGEN | Limitaciones adicionales |
|------------|------------|-----------|--|---------------------------------|
| Cabeza | Cuello | Fixed |  | |
| Cuello | Torso | Hinge |  | Aplicada velocidad en junta |
| Torso | Brazo | Spherical |  | |
| Torso | Enlace | Hinge |  | Aplicada velocidad en junta |
| Torso | Muslo | Spherical |  | |
| Enlace | Depósito | Hinge |  | Aplicada velocidad en junta |
| Antebrazo | Brazo | Spherical |  | |
| Antebrazo | Mano | Spherical |  | |
| Mano | Moto | Fixed |  | |
| Muslo | Pierna | Spherical |  | Se obliga a no girar a la junta |
| Pierna | Pie | Spherical |  | |
| Pie | Moto | Fixed |  | |

Tabla 3 Unión segmentos humano

Siendo las características de cada junta

| JUNTA | IMAGEN | DOF Traslación | DOF Rotación |
|--------------------|---|-------------------|-----------------|
| Cylindrical |  | 2 | 2 |
| Fixed |  | 3 | 3 |
| Hinge |  | 3 | 2 |

2.4.2 Parámetros adicionales. Armónicos

Se decide, a efectos demostrativos, dotar a la simulación de un movimiento armónico de ida y vuelta entre extremos y partiendo de posición centrada:

- Rotación a seguir generado desde el enlace.
- Simétrico entre partes del cuerpo.
- Con las extremidades formando movimiento de ida y vuelta hacia posiciones extremas simulando movimiento de tumbada en curva.
- Moto inmóvil.
- Obligando al torso a permanecer perpendicular a la dirección del supuesto avance.
- Usando como fijación a la moto manos y pies.
- Evitando colisiones entre moto y piloto (mediante iteraciones con los inputs para el movimiento).

Para ello, se usa la expresión de onda:

Figura 6 Expresión de onda

$$Y = A \times \sin(\omega t + \varphi) + Y_0$$

Donde A representa la amplitud, ω la frecuencia φ e Y_0 el desplazamiento inicial.

La frecuencia es siempre 120 deg/seg, o lo que es lo mismo $\frac{2\pi}{3} \frac{rad}{sg}$, es decir, un recorrido de ida y vuelta hasta posición inicial cada 3 segundos.

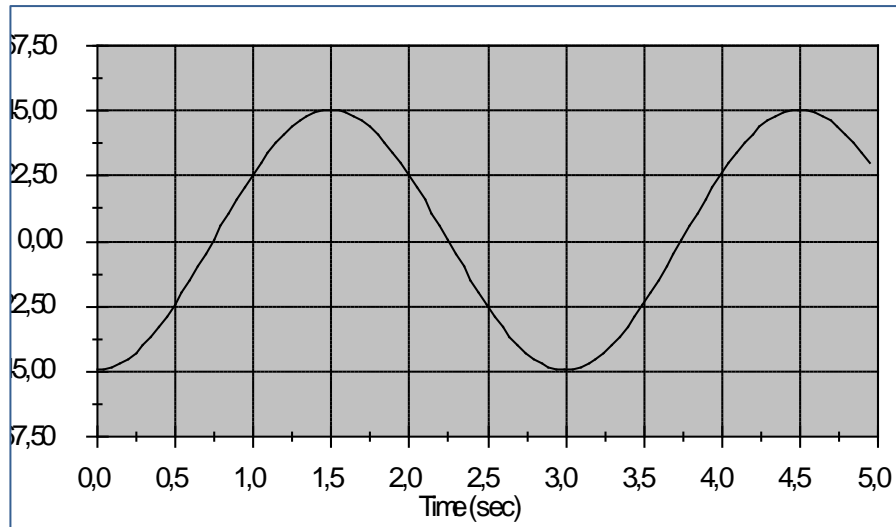
Así:

Cuello-torso

Velocidad aplicada en junta entre segmentos con la expresión:

$$Y = A \times \text{sen}(\omega t + \varphi) + Y_0 = 45 \times \text{sen}\left(\frac{2\Pi}{3}t - \frac{\Pi}{2}\right)$$

Gráficamente:



Nótese que los puntos donde la gráfica es 0, implican velocidad nula y por tanto se corresponde con las posiciones extremas de cada segmento (totalmente girado hacia izquierda, derecha y totalmente recto), mientras que los máximos y mínimos en esta gráfica corresponden a los puntos medios de las transiciones, donde la velocidad de giro es máxima.

Depósito-enlace

Análogamente:

Movimiento aplicado en junta entre segmentos con la expresión:

$$Y = A \times \text{sen}(\omega t + \varphi) + Y_0 = 45 \times \text{sen}\left(\frac{2\Pi}{3}t - \frac{\Pi}{2}\right)$$

Torso-enlace

Teniendo en cuenta los ejes locales de cada segmento, deberá ser igual que el depósito-anclaje, para garantizar que el torso permanece enfrente a la dirección de la velocidad

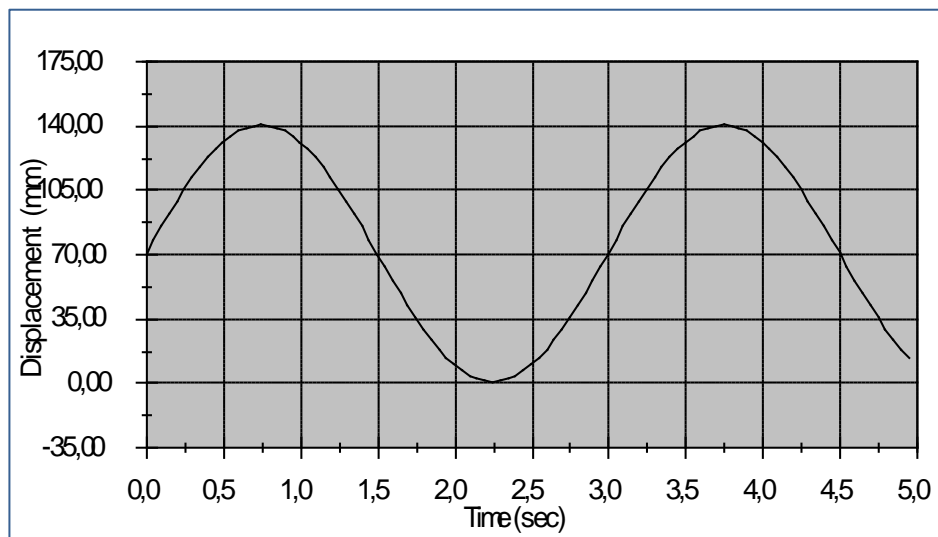
Velocidad aplicada en junta entre segmentos con la expresión:

$$Y = A \times \text{sen}(\omega t + \varphi) + Y_0 = 45 \times \text{sen}\left(\frac{2\Pi}{3}t - \frac{\Pi}{2}\right)$$

Antebrazo derecho

Movimiento aplicado en la parte, con respecto a la moto. La expresión del movimiento quedaría:

$$Y = A \times \text{sen}(\omega t + \varphi) + Y_0 = 70 \times \text{sen}\left(\frac{2\Pi}{3}t\right) + 70$$



Obsérvese que existe un desplazamiento inicial, inducido tras varias iteraciones para no incurrir en una posición inicial no convergente.

Antebrazo izquierdo

Movimiento aplicado en la parte, con respecto a la moto. La expresión del movimiento quedaría:

$$Y = A \times \text{sen}(\omega t + \varphi) + Y_0 = 70 \times \text{sen}\left(\frac{2\Pi}{3}t\right) - 70$$

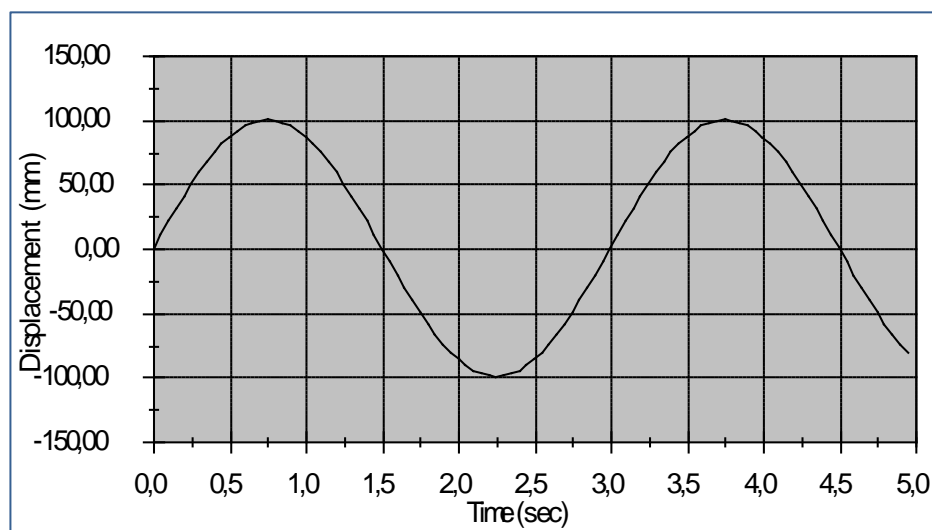
Muslo derecho

Movimiento aplicado en la parte, con respecto a la moto. Además en la junta se imposibilita la rotación del segmento

La expresión del movimiento quedaría:

$$Y = A \times \text{sen}(\omega t + \varphi) + Y_0 = 100 \times \text{sen}\left(\frac{2\Pi}{3}t\right)$$

Gráficamente:

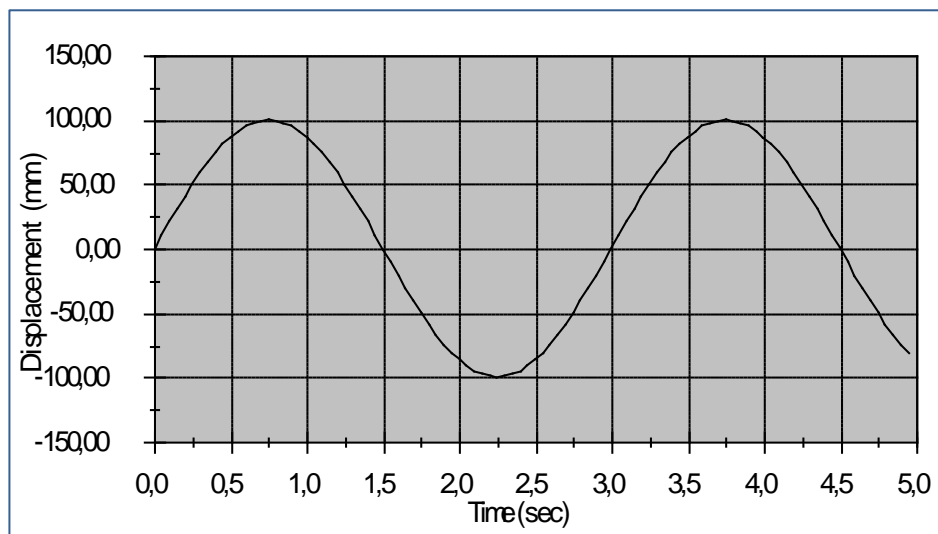


Muslo izquierdo

Con el razonamiento análogo que en su segmento simétrico, la expresión del movimiento quedaría:

$$Y = A \times \text{sen}(\omega t + \varphi) + Y_0 = 100 \times \text{sen}\left(\frac{2\Pi}{3} t\right)$$

Gráficamente:



2.5 Paso a paso de la animación

Con todos estos datos metidos en la herramienta, la simulación quedaría así para los siguientes tiempos más representativos:

$T=0\text{sg}$

Momento inicial, la posición del piloto sería la adoptada en recta:

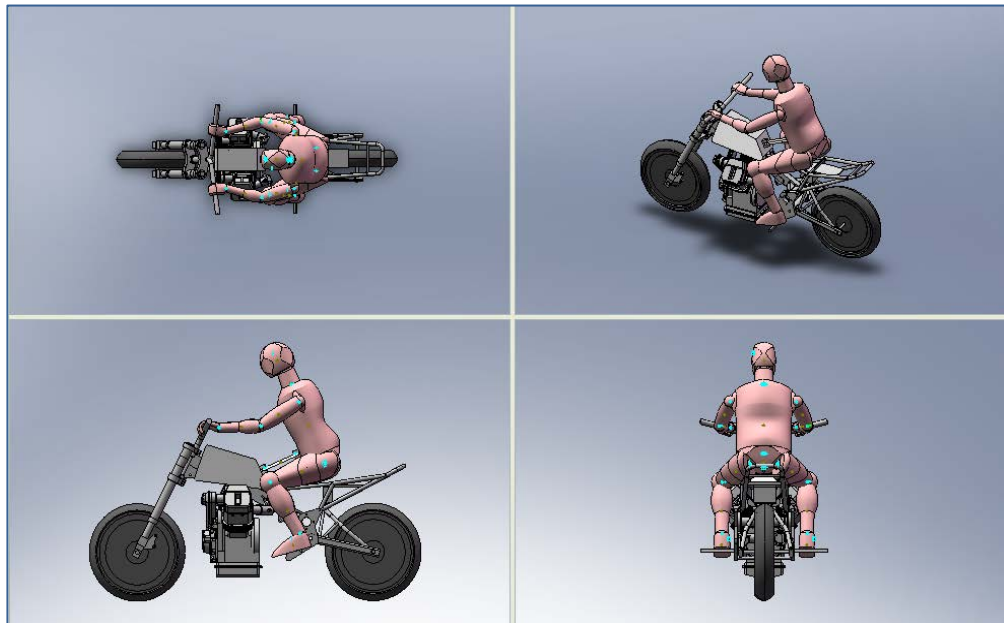


Ilustración 7 Vistas piloto erguido

$T=0,75\text{ sg}$

Representando el 25% de la simulación, el piloto se encuentra en la posición más ladeada hacia su derecha.

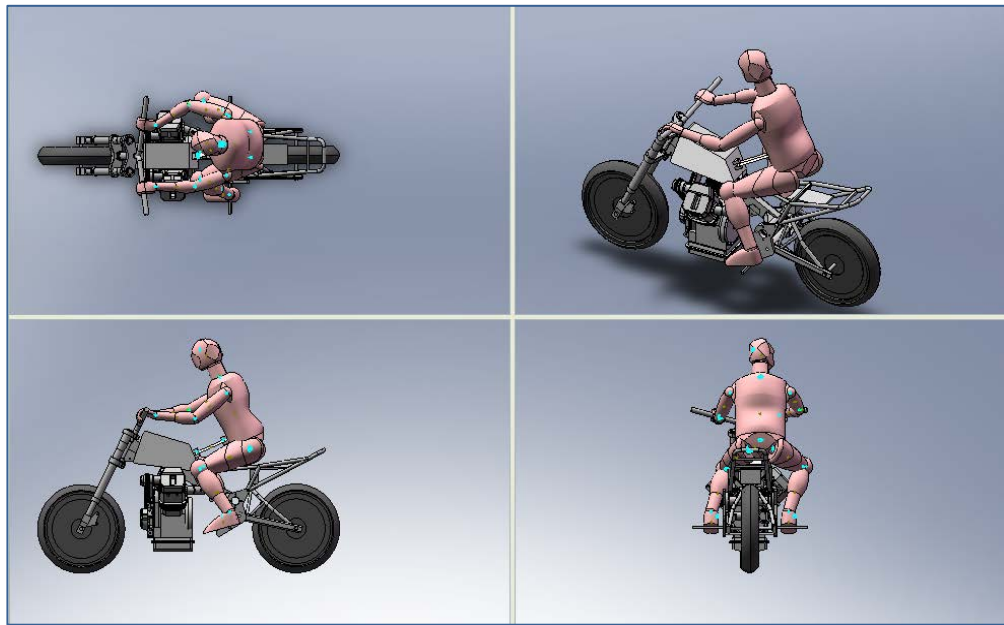
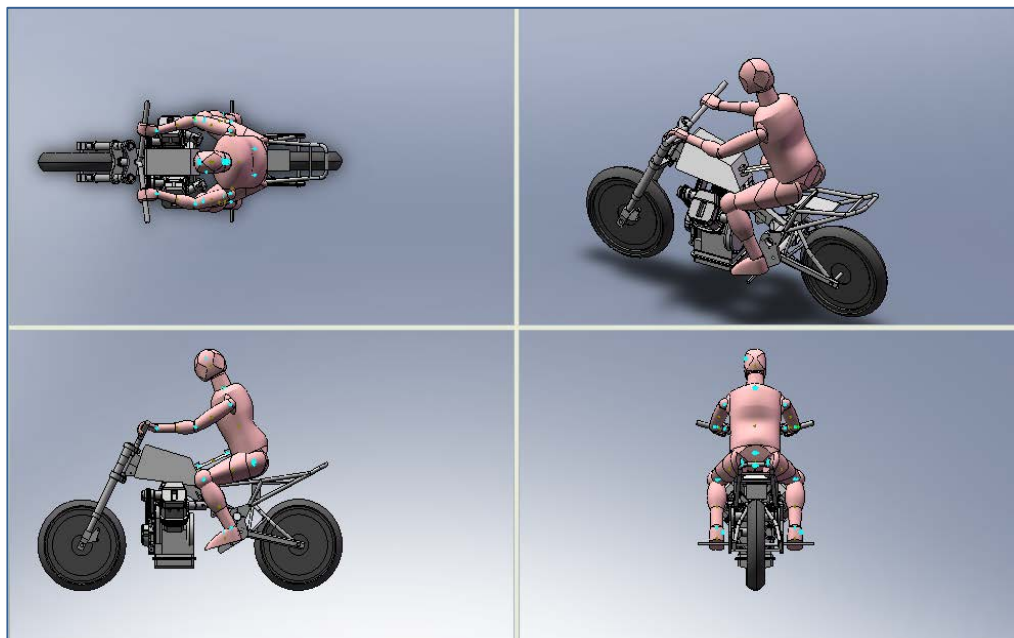


Ilustración 8 Vistas piloto derecha
 $T=0,75$ sg

Hacia la mitad de la simulación, deberemos encontrarnos de nuevo en el punto medio, habiendo recuperado la verticalidad.



$T=2,25$ sg

Simétrica a la postura conseguida para $t=0,75$ sg, pero con el piloto representando viraje hacia su izquierda.

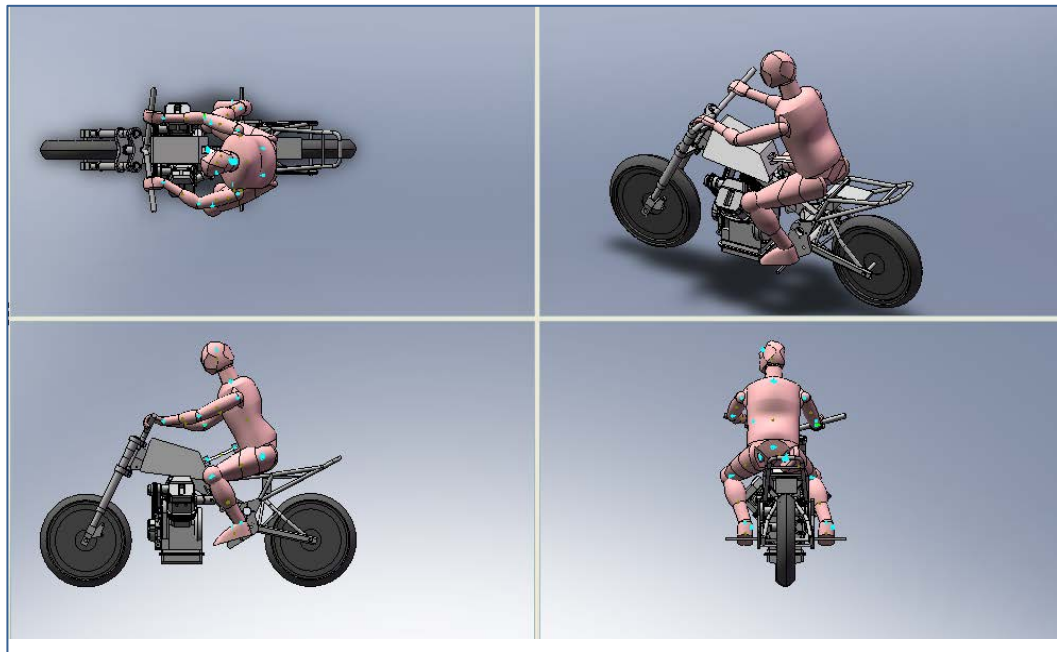
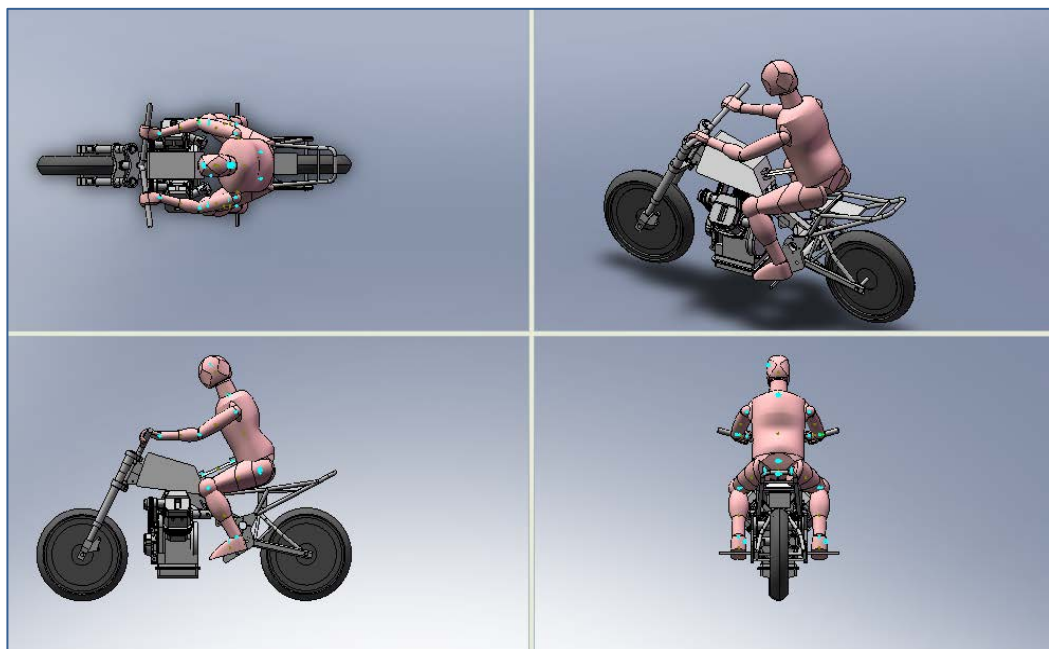


Ilustración 9 Vistas piloto izquierda
 $T = 3 \text{ sg}$

Representa un ciclo completo, con lo que nos encontramos en la posición inicial, con el piloto erguido de nuevo.



Se considera por tanto demostrada la movilidad del modelo así como la posibilidad de dotación de movimiento mediante los siguientes inputs:

- I. Velocidad/desplazamiento en depósito-enlace, enlace torso y cuello-torso, ya que son idénticos.
- II. Velocidad/desplazamiento en segmento antebrazo, con posibilidad de simetría entre partes derecha e izquierda.
- III. Velocidad/desplazamiento en segmento muslo, con posibilidad de simetría entre partes derecha e izquierda.

Como demostración, usaremos el ejemplo para esta misma simulación del desplazamiento que sufre el dentro de gravedad del torso en el eje perpendicular al sentido de la velocidad:

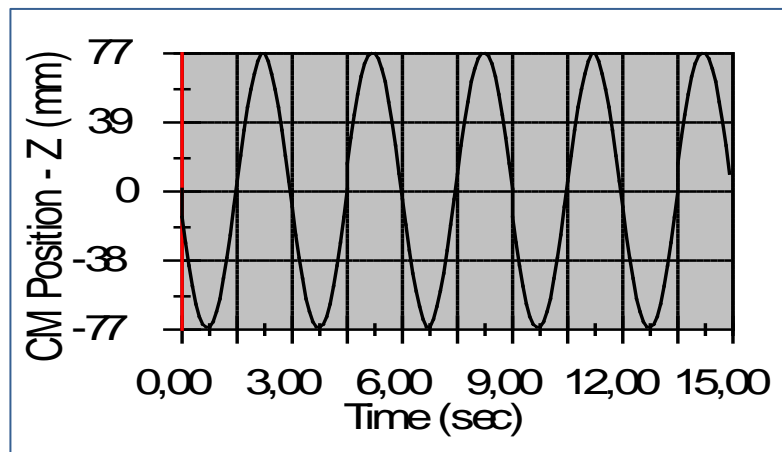


Figura 7 Traslación CDM representativo

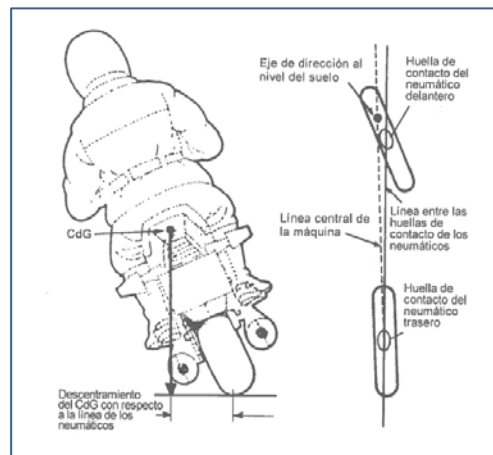
Teniendo en cuenta que se han usado parámetros conservadores en términos de desplazamiento para esta simulación, se puede observar un desplazamiento entre extremos de 154 mm, con lo que queda demostrado el objetivo correspondiente

Nótese que la filosofía del modelo es dar libertad al ensamblar (rótula, contrarrótula es la relación entre componentes más usada), para posteriormente en el módulo de simulación imponer las limitaciones necesarias para que el modelo converja

3. Análisis de la influencia del piloto

3.1 Punto de partida: Análisis teórico dinámico

Una motocicleta en movimiento se encuentra en equilibrio inestable. La condición que garantiza que permanezca en equilibrio es que el centro de gravedad global (sumando la contribución del piloto y la propia moto), se encuentre en la vertical que une las huellas de contacto de los neumáticos delantero y trasero, como se describe en la imagen.



Para el mantenimiento de dicho equilibrio se contribuye de diferente manera en el caso de baja y alta velocidad:

- **Baja velocidad:** Sin movimientos giroscópicos actuando de manera representativa en estas condiciones, hay que actuar sobre todo en el ángulo de manillar y en menor medida, con el desplazamiento del cuerpo del piloto. Parámetros que ayudan al mantenimiento del equilibrio a baja velocidad pueden ser un CdG bajo, un ángulo de avance grande, así como un ángulo de lanzamiento pequeño
- **Alta velocidad:** En estas condiciones, se debe tener en cuenta el efecto de los momentos giroscópicos, cuyo análisis se detalla en un apartado dedicado a ello. (Momentos giroscópicos)

3.2 Trayectoria rectilínea

Además de las generalidades descritas en el apartado anterior, específicamente para la moto desplazándose en línea recta, os factores que influyen en su estabilidad, serían:

Inercia

Proporcional a la masa y la velocidad del conjunto moto-piloto.

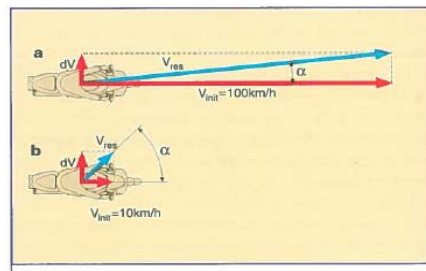


Ilustración 10 Influencia inercia

Por tanto, y según el caso concreto de la figura de apoyo, será más fácil modificar el vector velocidad en el caso b, o lo que es lo mismo, a igual perturbación lateral, será mayor la el cambio lateral de trayectoria.

Parámetro geométrico de la dirección “trail”

Se puede definir como la distancia virtual entre el punto en el que apoya la rueda en el suelo y el eje de giro. El trail por tanto depende del ángulo de la dirección y el avance de la horquilla.

Un valor alto de trail estabiliza (auto alinea la dirección) a altas velocidades.

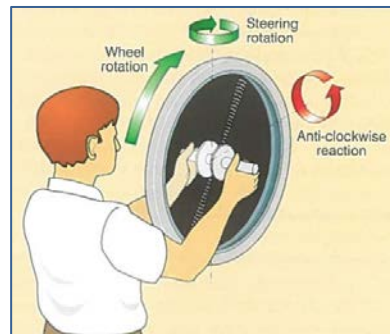


Ilustración 11 Parámetro trail

Otros parámetros a tener en cuenta serían los ya mencionados efectos giroscópicos, ángulo de avance o distancia entre ejes de la moto.

3.3 Momentos giroscópicos

Para comprender el momento giroscópico se acude a la definición de uno de los tres más patentes en la dinámica de la motocicleta, la precesión giroscópica, con la ayuda de la siguiente imagen:



Se observa un sólido con giro propio (“wheel rotation”), y cómo al ser sometido a una rotación de su eje hacia la derecha (“steering rotation”), surge un tercer par que “inclina” hacia la izquierda la rueda (“anti-clockwise reaction”).

El momento giroscópico analíticamente toma esta expresión:

$$M_{gyr} = I_r \times \omega_r \times \omega_s$$

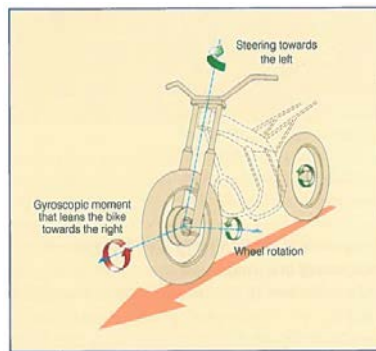
Donde:

- I_r representa el momento de inercia del cuerpo
- ω_r representa la velocidad de rotación
- ω_s velocidad del eje respecto al plano de la rueda

Existen principalmente tres momentos giroscópicos reseñables cuando una moto está en movimiento, cuyos nombres en inglés, son:

- Steering moment
- Rolling Moment
- Yawing Moment

Steering moment



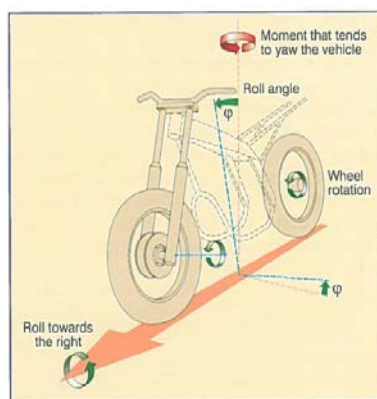
Es el momento que surge al aplicar la maniobra de contra manillar. Es muy útil en entrada en curva, por tanto.

En la práctica, si aplicamos un giro de manillar hacia la izquierda, considerando que la rueda delantera está girando en sentido de la marcha, surge un par que inclina la moto a izquierdas → (favorece el ángulo de inclinación, o “roll angle”).

Es la definición de precesión giroscópica.

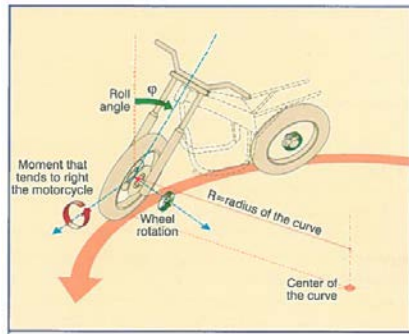
Extrapolando a la dinámica de la moto, este caso sería típico de la rueda delantera en una corrección del manillar, sin embargo también se da en menor orden de magnitud en el caso de la rueda trasera.

Rolling Moment



Se explica desde el siguiente caso: con la rueda delantera favoreciendo el avance de la moto (girando en el sentido de la marcha), si inducimos una inclinación hacia la derecha de la nuestra trayectoria, surge un par que contrarresta dicha inclinación (“roll”), pero favorece el giro (“yaw”). Se considera estabilizador, por tanto.

Yawing Moment



Este momento cobra relevancia durante las curvas, cuando la rueda delantera está girando, y simultáneamente se está favoreciendo inclinación de la moto (mediante transferencia de pesos del piloto, por ejemplo). Atendiendo a la figura, si la rueda delantera gira a favor del sentido de la marcha y simultáneamente aplicamos un par que inclina la curva a izquierdas, surge un momento que tiende a estabilizar la motocicleta (“roll” estabilizador).

Este es el momento que más afecta en una situación de mantenimiento de curva (supuesto en el que se ha alcanzado el ángulo de inclinación necesario para abordar un radio de giro concreto). Sin embargo, lo obviaremos en posteriores análisis de nuestros casos a estudio por los siguientes motivos:

- Consideramos situación no transitoria (mantenemos inalterado el ángulo de inclinación de la moto) y nuestro manillar es inmóvil.
- Es de orden de magnitud menor al resto de fuerzas/momentos implicados.
- En diversos estudios de la bibliografía consultados lo consideran despreciable. Citamos de Vittore Cossalter, que en su capítulo dedicado al mantenimiento de curva, a efectos de cálculo de ángulo de ideal, obvia los efectos de los momentos giroscópicos [“... we introduce the following simplifying hypothesis: The gyroscope effect is negligible”] (Cossalter, 2006).

Conviene mencionar que elementos como el motor, dado que tiene elementos con momentos de inercia de importante magnitud y con rotación propia (volante de

inercia, cigüeñal), también ejercen un par giroscópico, generalmente estabilizador y de igual modo, proporcionales a la velocidad.

3.4 Trayectoria curvilínea

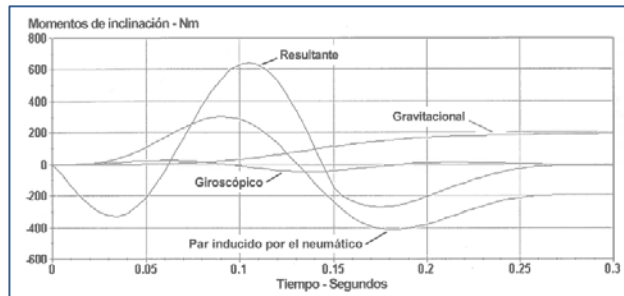
Se analizará por separado el inicio y mantenimiento de curva como dos fases bien diferenciadas, y tras ello, se tomará una decisión sobre cuál de los supuestos conviene analizar más en profundidad en los siguientes apartados:

Inicio de la curva: Se describe a continuación el proceso de cambio de trayectoria, los parámetros que influyen en ella, y los principales fenómenos que se dan cita. Se toma un ejemplo concreto:

- a) Se efectúa contramanillar hacia la derecha. La motocicleta por efecto de la fuerza centrípeta se inclina hacia la derecha. Esta maniobra de contramanillar es la mayor influencia que existe a la hora de girar la moto.
- b) Se produce como resultado de lo anterior una precesión que tenderá a inclinar la moto a izquierdas. Efecto de menor orden de magnitud que el anterior.
- c) Con la moto inclinada, la gravedad favorece que la moto aumente dicha inclinación, si bien este efecto se va contrarrestando en proporción al aumento de la fuerza centrípeta sobre los neumáticos. En un momento dado, se logra **el estado de equilibrio** o estacionario, que sucede cuando el par de la gravedad iguala al producido sobre la moto de la fuerza centrípeta. Es este el caso elegido para nuestros análisis posteriores.
- d) A partir de este momento, se puede perturbar el equilibrio alcanzado bien por actuación sobre el manillar o bien por cambio en la inclinación de la moto, aunque se dan momentos giroscópicos que actúan en el sentido de preservar dicho equilibrio.

Ahora bien, la maniobra de contramanillar descrita en a) puede sustituirse por inclinar la moto en el sentido contrario al a trayectoria final buscada como elemento inestabilizador necesario. Este método produce una respuesta mucho menor y un control menos preciso (Foale, 2003).

Acudiendo a un caso de estudio concreto en el cual se analiza el cambio de dirección sólo con movimiento del cuerpo sin girar la dirección (Foale, 2003), las conclusiones son que el movimiento del cuerpo del piloto influye en mucha menor medida que la maniobra de contra manillar, y sus efectos son difícilmente controlables.



Y se traduce en ángulo de inclinación como se muestra a continuación:

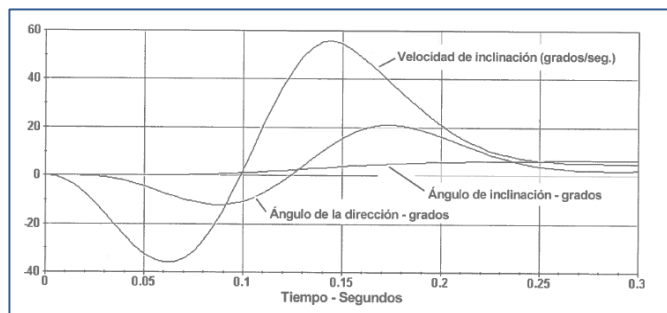
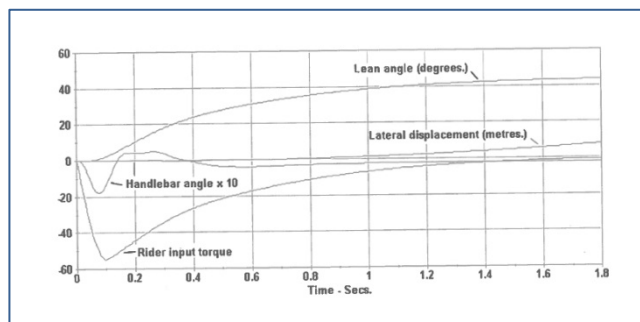


Figura 8 Inclinación vs tiempo

Que comparado con un caso con par inducido en el manillar por el piloto (contempla igualmente momentos giroscópicos), resulta que el ángulo de inclinación para esos primeros 0,3 sg aumenta de $<10^0$ en el primer caso a un valor cercano $>15^0$ en el segundo (aplicando contramanillar).



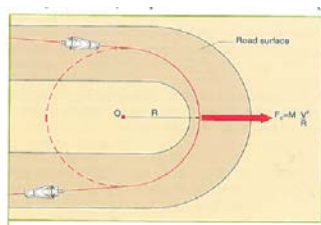
Se deduce por tanto:

- La influencia del cambio de posición del piloto es menos relevante que el contramanillar en el inicio de la curva, si bien es una maniobra complementaria.
- Las maniobras necesarias para desestabilizar la moto y lograr el inicio de la curva, se dan en un tiempo muy pequeño (de orden de magnitud de décimas de segundo) y contemplan fenómenos muy complejos de estudiar.

Por tanto: estudiaremos influencia de posición del piloto en mantenimiento de curva, y con esta conclusión se cumple el objetivo “Decisión del enfoque del análisis justificada”.

3.4.1 Fundamentos mantenimiento de curva

Supuesta una curva de radio “ R ” respecto a centro de rotación “ O ”, y supuesto estado de equilibrio, en el que un motorista describe una trayectoria circular a velocidad lineal “ v ”, tal como se muestra en la ilustración:



Despreciando los efectos giroscópicos y situándonos en el plano que se enfrenta al avance del piloto en un momento dado, quedaría el siguiente esquema:

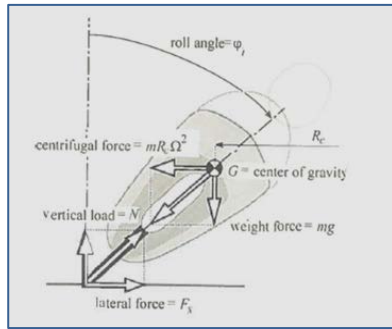


Ilustración 12 Desglose de fuerzas plano moto

Siendo:

- ϕ_i : Ángulo de inclinación ideal
- Ω : Velocidad angular
- m : masa total
- G : Situación del centro de gravedad global
- R_c : Radio de la curva
- $N (F_n)$: Fuerza normal
- G : gravedad
- F_s : Fuerza de rozamiento en el punto de contacto rueda-suelo

Y considerando:

“A” como el punto de contacto rueda suelo.

Sobre el CDM y el plano representado, igualando fuerzas:

Eje vertical:

$$F_n = m \times g$$

Eje horizontal:

$$\{\Omega = V \times R\} \Rightarrow F_s = m \times R_c \times \Omega^2 = \frac{m \times V^2}{R}$$

Y considerando estado de equilibrio \rightarrow no hay giro respecto al eje Z (el que sale del papel).

Por equilibrio de momentos respecto al CM, se deduce que:

$$AG \times F_n = AG \times F_s \xrightarrow{\text{relacionando ángulos}} \frac{F_s}{F_n} = \tan(\varphi) = \frac{V^2}{R \times g}$$

Y para usos posteriores, usaremos:

$$\sqrt{\tan(\varphi) \times R \times g} = V_{real}$$

Figura 9 Velocidad dado ángulo inclinación

Observando esta fórmula, la velocidad depende, una vez fijado el radio de la curva, unívocamente del ángulo de inclinación.

Por tanto, a continuación se estudiará cómo favorece al paso por curva el hecho de inclinar el cuerpo hacia el centro de la curva (acercándolo al suelo verticalmente, y al centro de rotación horizontalmente). Con esta maniobra, se aumentará el ángulo de inclinación global, dejando inalterado el de la rueda, y en consecuencia, la solicitación lateral del neumático.

En las siguientes gráficas se ilustra la ganancia en ángulo de inclinación por la postura del piloto, representado como $\Delta\alpha$ y $\Delta\varphi$ respectivamente.

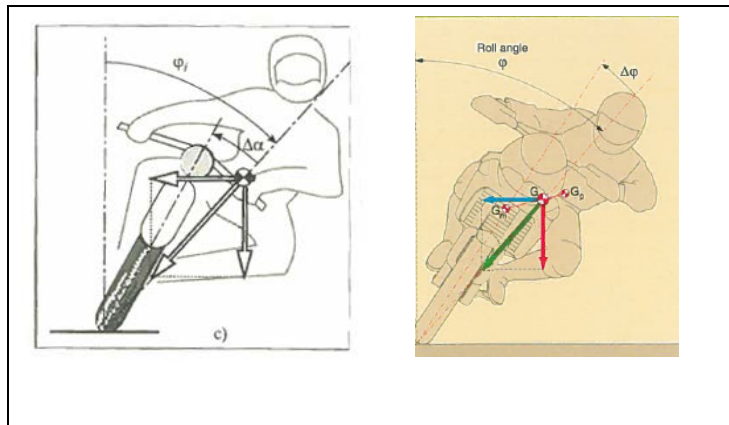
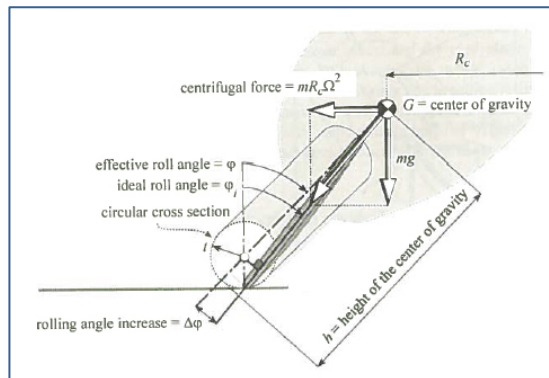


Ilustración 13 Influencia posición piloto

Se define a continuación el concepto **ángulo efectivo de inclinación** frente al ángulo ideal que se ha estado considerando hasta ahora.

Dicho ángulo pretende dar explicación al efecto sobre el ángulo de inclinación al contemplar el caso más realista de ruedas con espesor mayor que 0, debido a que el contacto con el suelo afecta las hipótesis hechas con anterioridad en el cálculo de momentos y fuerzas para una moto en giro en estado de equilibrio.

Analizando la composición de fuerzas en un caso real con rueda de espesor $2t$:



Analíticamente:

$$\varphi = \varphi_i + \Delta\varphi \xrightarrow{\text{relacionando ángulos}} \frac{\text{sen} \Delta\varphi}{t} = \frac{\text{sen} \varphi_i}{h - t}$$

Por tanto

$$\varphi = \varphi_i + \Delta\varphi = \varphi_i + \frac{t \times \text{sen} \varphi_i}{h - t}$$

Siendo:

- φ = Ángulo de inclinación efectivo
- φ_i = Ángulo de inclinación ideal
- $\Delta\varphi$ = Aumento de ángulo de inclinación por espesor de rueda
- h = distancia máxima desde el punto distal de la rueda hasta el CdG de la moto
- t : espesor del neumático

En conclusión:

- ✓ El ángulo efectivo de inclinación es mayor al ideal considerando ruedas reales, y aumenta si se incrementa el espesor de la rueda a estudio (mayor espesor implica la necesidad de mayores inclinaciones para la misma velocidad de paso por curva) o la altura del CdG disminuye.
- ✓ A la hora de abordar los cálculos para los casos prácticos, será observado lo anterior en el planteamiento de los mismos.

3.5 Transmisión de fuerzas

La transmisión de fuerzas piloto-moto se hará a través de las empuñaduras y estriberas, ya que deberán estar fijos (fuerzas en misma dirección y sentido contrario).

No se desarrolla más este análisis ya que dependerá de las relaciones de posición que se establezcan.

3.6 Modificación motocicleta referencia: estriberas y manillar

Manillar

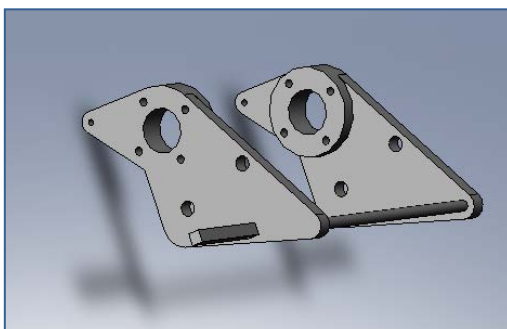


El manillar ha sido diseñado con los siguientes criterios:

- a) Debe ser concéntrico a la pipa de dirección.
 - b) La posición que genere en las manos ha de favorecer la postura buscada.
- Esta última condición dio lugar a varias iteraciones del modelo hasta su forma final.

Su peso es de 2287,33 gramos.

Pletinas con estriberas



Las pletinas se modificaron por la necesidad de apoyar el pie del piloto en un ángulo concreto que permitiese la postura de las piernas buscada.

Su peso es de 1801.22 gramos

3.7 Casos a estudio. Análisis de resultados

Como se ha justificado en apartados anteriores del apartado 3, se ha tomado las decisiones y simplificaciones siguientes:

- Estudiar dinámicamente la influencia del ángulo de inclinación (y la influencia que en él tiene la postura del piloto) en la velocidad, durante la fase de mantenimiento de curva debido a que es en el caso en el que más influye.

Recordando las justificaciones más relevantes:

- a) En la fase de iniciación de curva, la maniobra con más relevancia es el contra manillar, resultando insuficiente e ineficaz intentar dicha fase usando sólo transferencia de pesos.
 - b) En la fase de iniciación de curva, los fenómenos que se dan cita son muy transitorios y se localizan en tiempos muy pequeños (del orden décimas de segundo).
- Los momentos giroscópicos se desprecian por estar en una posición de equilibrio y con el manillar fijo (lo que inactiva el par más representativo durante la fase de mantenimiento de curva, el “yaw moment”).

Por tanto, el objetivo concreto del análisis es cuantificar la diferencia de velocidad que se puede ganar sobre la posición erguida, en varias situaciones:

- Se asimilará el ángulo de inclinación efectivo al ángulo ideal

Para ello, se ha impuesto relaciones de posición a la rueda para que su plano medio sea tangente al suelo. Esta decisión se tomó por los siguientes motivos:

- a) La geometría del modelo de rueda delantera prácticamente obliga a ello.
- b) El objeto del análisis es comparativo más que puramente cuantitativo.
- c) Porque la relación t/h es favorable en este caso (espesor pequeño).
- d) Porque el espesor de los neumáticos delantero-trasero es diferente.
- e) Porque la pisada delantera y trasera modifica la geometría del modelo al aplicar distintos ángulos de inclinación, complicando más su análisis que el beneficio que se pueda sacar obviando la simplificación.

3.7.1 Caso #1: 100 km/h y 300 m de radio

El método será: dado un radio de curva y un ángulo de referencia, se estudiará la ganancia en velocidad de paso por curva, cuando el piloto se inclina hacia la curva, con respecto a una posición erguida (antinatural).

Para ello, se elige el valor del radio (que será 300m, caso de una curva de amplio giro), y según la tabla bajo estas líneas (Foale, 2003), se toma un ángulo de inclinación como referencia de 15 grados, que se aplica en el plano medio del conjunto frente a la vertical.

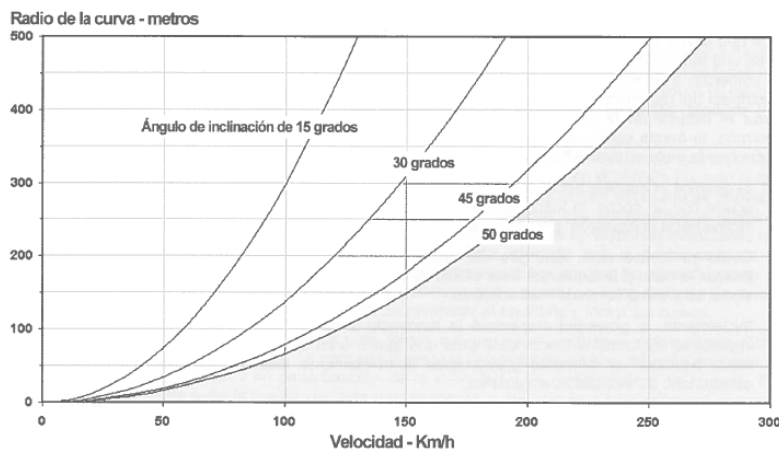


Figura 10 Radio vs Velocidad vs Ángulo de inclinación

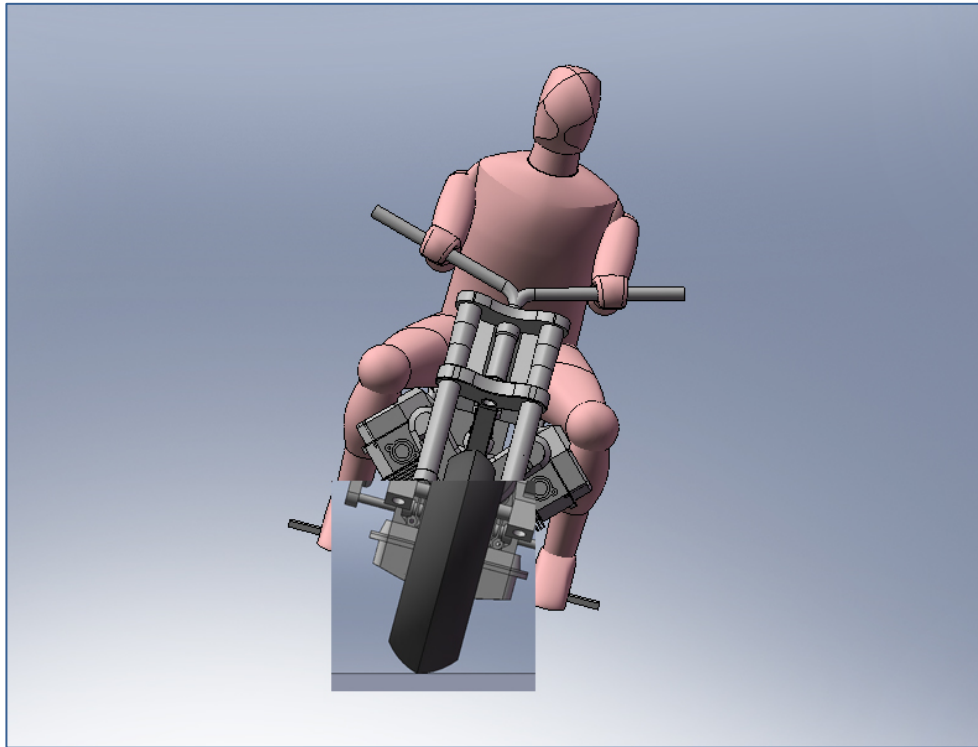
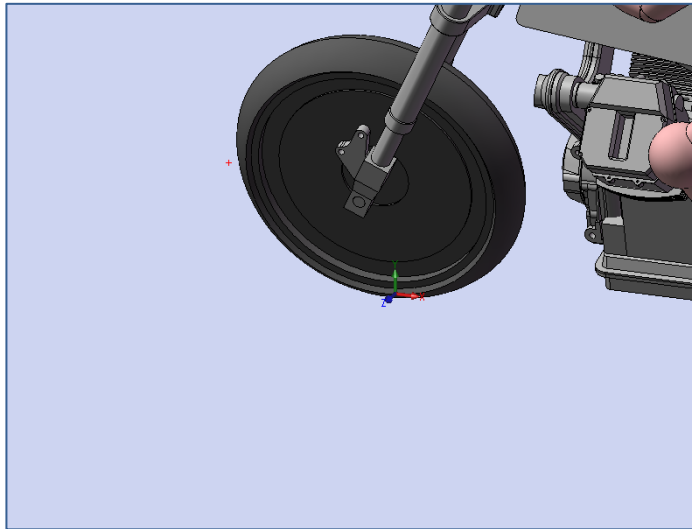


Ilustración 14 Simplificación ángulo efectivo

Se considera efectivo= ángulo ideal por las simplificación del modelo q se ha hecho.

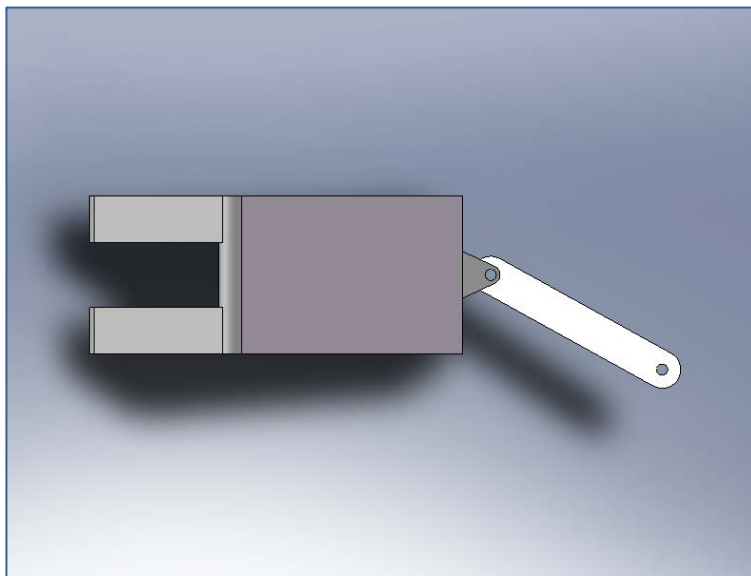
Para ello tomamos las medidas del CDG con la moto inclinada y el piloto erguido, situándose el origen de referencia en el punto medio del contacto de la rueda delantera, resultando:

- $X = 818.24$
- $Y = 609.13$
- $Z = 160.35$



Tras lo cual se coloca el piloto en una posición de giro acorde con la inclinación.

Para ello, el enlace se gira en sentido horario en una posición intermedia y se trata de que tanto los codos como las rodillas queden en un plano que no diste del inicial respecto del suelo, buscando la mayor facilidad en una simulación real con el mínimo número de inputs.



El resto de segmentos se asocian respetando las mismas limitaciones que tendría el modelo dinámico en “Cosmos Motion”, vigilando que no haya colisiones entre ninguna parte de moto y piloto.

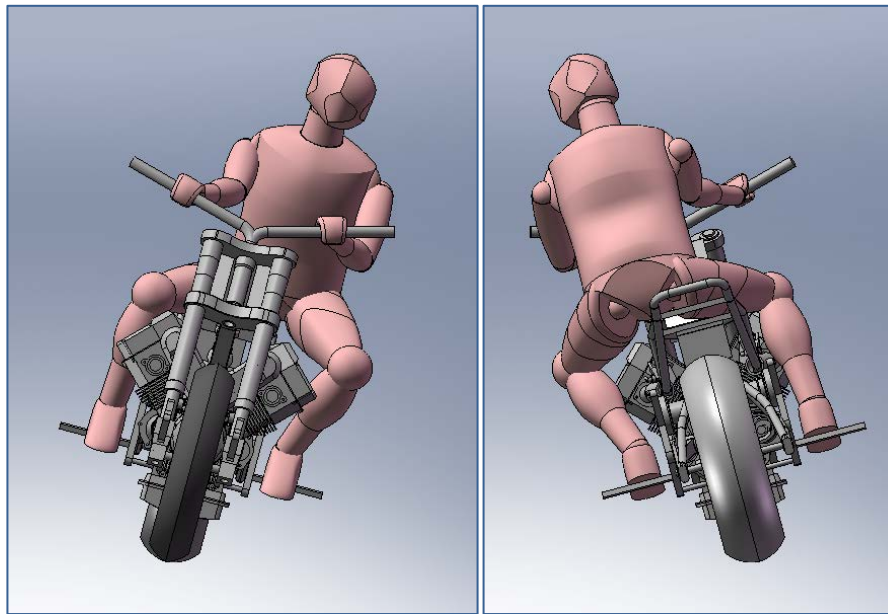


Ilustración 15 Tumbada 15°

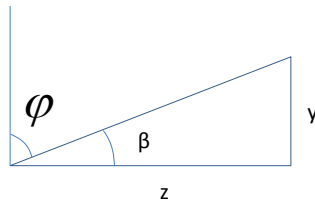
La herramienta arroja en este caso

- $X = 813.27$
- $Y = 599.13$
- $Z = 187.71$

Recopilando y centrando en las dos dimensiones (X y Z), en tanto en cuanto acercan el CDG total al centro de curvatura, recopilando datos:

| | Piloto erguido | Piloto inclinado |
|-------|----------------|------------------|
| Y[mm] | 609.13 | 599.13 |
| Z[mm] | 160.35 | 187.71 |

Conocidos los dos catetos del triángulo:



$$90 = \varphi + \beta$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{y}{z}\right)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{V^2}{R \times g}$$

Se deduce que:

$$\sqrt{\tan(\varphi) \times R \times g} = V_{real}$$

Siendo:

- $R=300 \text{ m}$
- $g=9,81 \text{ m/sg}^2$

Para la conversión desde unidades internacionales a kmh se usa

$$\frac{1\text{km}}{\text{hora}} = \frac{1000\text{m}}{3600\text{sg}}$$

| | Piloto erguido | Piloto inclinado |
|------------|-------------------------|--------------------------|
| φ | 14,75° | 17,34° |
| V_{real} | 100,2 km/h (27,84 m/sg) | 109,12 km/h (30,31 m/sg) |

Tabla 4 Mejora Caso 1

Lo que arroja un incremento de paso por curva de 8,92 kmh, que representa un incremento de 8,9%.

3.7.2 Caso #2: 150 km/h y 300 m de radio

Se toma un ángulo de inclinación como referencia de 30 grados, que se aplica en el plano medio del conjunto frente a la vertical. Se aplican las mismas modificaciones que en el apartado anterior

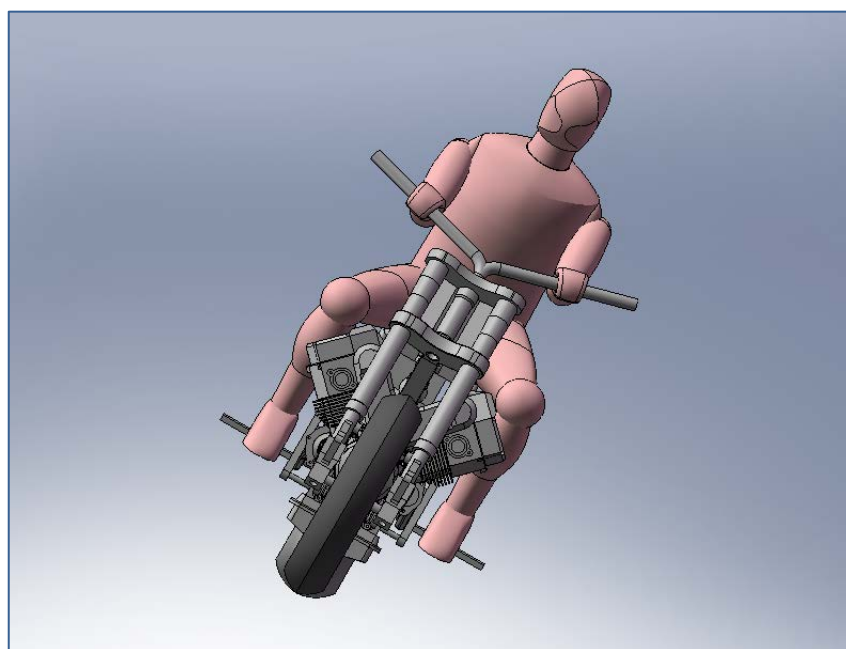
Para ello tomamos las medidas del CDG con la moto inclinada y el piloto erguido, situándose el origen de referencia en el punto medio del contacto de la rueda delantera.

Tras lo cual se coloca el piloto en una posición de giro acorde con la inclinación.

Para comprobar la validez de las limitaciones que imponemos a nuestro modelo a través del recorrido circular del enlace, subdividiremos el caso a estudio en dos:

- a) Uno ciñéndose al recorrido impuesto por el enlace (torso unido por bisagra al enlace)
- b) Otro dando libertad al piloto para que se “descuelgue”, hasta donde la colisión con el chasis lo permita (teniendo en cuenta que la moto no tiene sillín)

Ambos casos se compararán, análogamente al caso anterior, con el piloto en posición erguida y con el conjunto moto piloto formando 30° con la vertical, como se aprecia en la siguiente imagen:



Arrojando la herramienta los siguientes datos:

- $X = 818.23$
- $Y = 546.88$
- $Z = 312.41$

Estudio a)

Para ello, el enlace se gira en sentido horario en una posición intermedia y se trata de que tanto los codos como las rodillas queden en un plano que no diste del inicial respecto del suelo, buscando la mayor facilidad en una simulación real con el mínimo número de inputs.

El resto de segmentos se asocian respetando las mismas limitaciones que tendría el modelo dinámico en “Cosmos Motion”, vigilando que no haya colisiones entre ninguna parte de moto y piloto, quedando la siguiente postura:

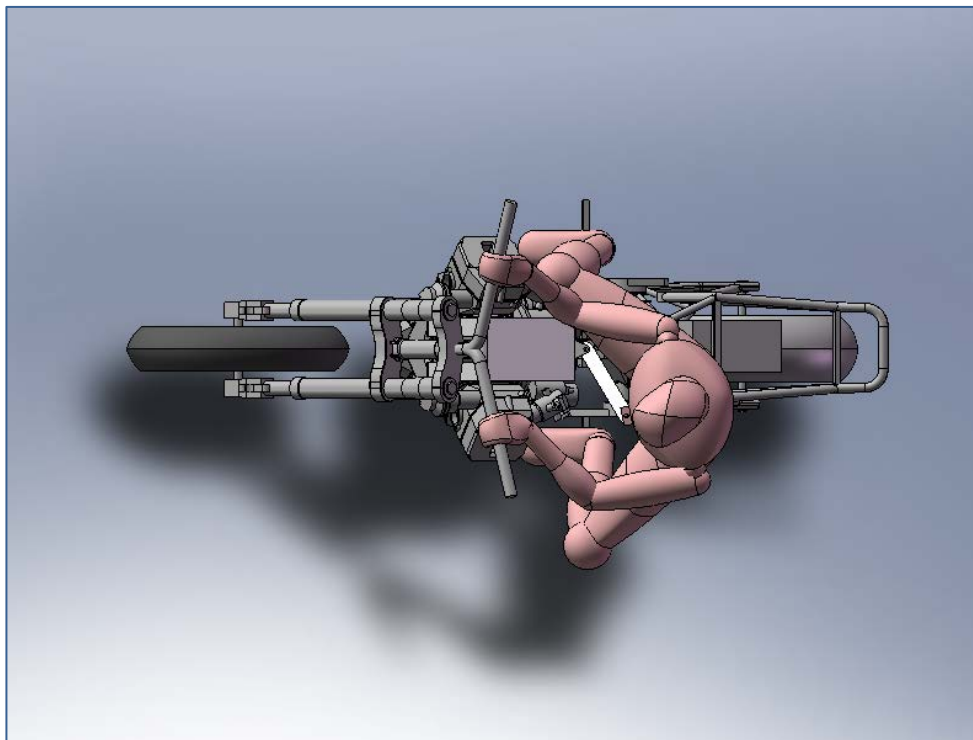
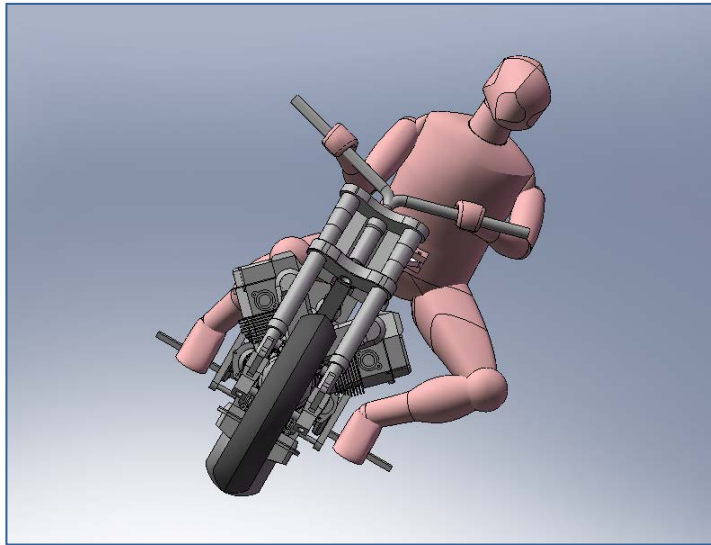


Ilustración 16 Tumbada 30°

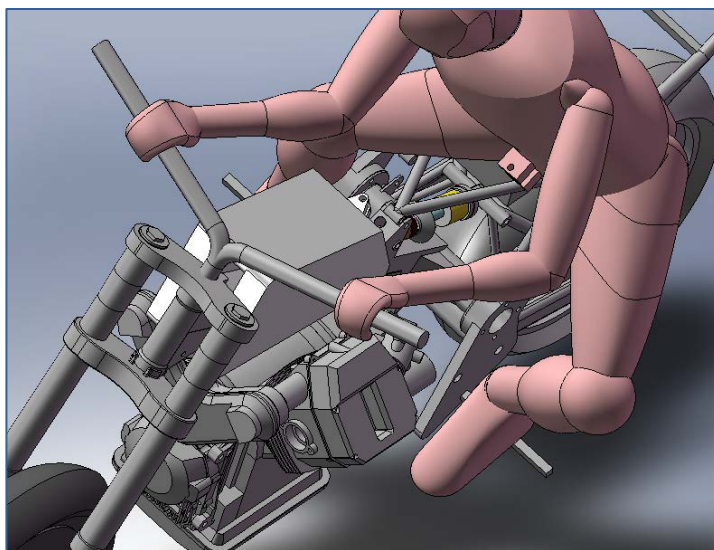


Siendo el nuevo CdG:

- $X = 798.50$
- $Y = 516.14$
- $Z = 340.47$

Estudio b)

Nos situamos en el caso más extremo, incluso la mano cambia de posición en el manillar. Dar dinámicamente los parámetros necesarios para lograr esta postura sería complicado ya que añade grados de libertad (que se traduce en inputs a introducir en la herramienta).



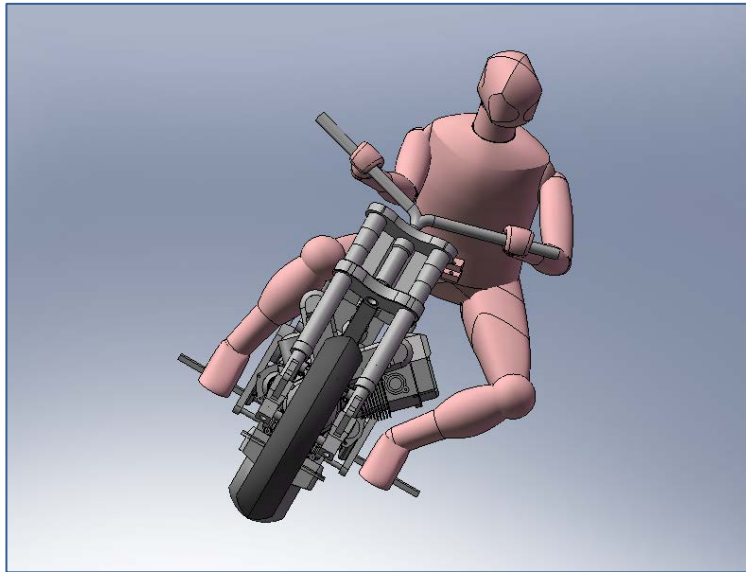


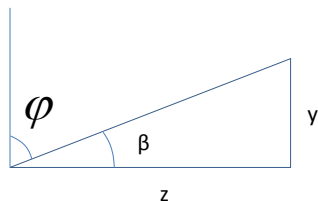
Ilustración 17 Tumbada 30° sin enlace

Quedando el CdG en las coordenadas:

- $X = 823.95$
- $Y = 533.37$
- $Z = 352.47$

Resumiendo:

| | Piloto erguido | Piloto inclinado. Caso a) | Piloto inclinado. Caso b) |
|------|----------------|---------------------------|---------------------------|
| Y | 546,88 | 516,14 | 533,37 |
| [mm] | | | |
| Z | 312,41 | 340,47 | 352,47 |
| [mm] | | | |



$$\beta = \arctan\left(\frac{y}{z}\right) \quad \tan(\varphi) = \frac{V^2}{R \times g}$$

Se deduce que:

$$\sqrt{\tan(\varphi) \times R \times g} = V_{real} \cdot$$

Siendo:

- $R=300m$
- $g=9,1 \text{ m/s}^2$

Para la conversión desde unidades internacionales a km/h se usa:

$$\frac{1km}{hora} = \frac{1000m}{3600sg} \cdot$$

| | Piloto erguido | Piloto inclinado. Caso a) | Piloto inclinado. Caso b) |
|------------|----------------|---------------------------|---------------------------|
| φ | 29,738 | 33,411 | 33,458 |
| V_{real} | 147,61 | 158,62 | 158,76 |
| Ganancia[] | | 7,46% | 7,55% |

Tabla 5 Mejora Caso 2

La conclusión es que la mejora es muy pequeña en el caso b, luego nuestra geometría propuesta, el ángulo en el que se coloca en enlace, y en definitiva la envolvente de posturas que te permite el modelo (entendiéndose como el conjunto que forma ensamblaje con las relaciones de posición / juntas), lo hace válido.

Adicionalmente, se observa que el efecto de la inclinación se hace más patente en el caso de la velocidad más baja.

3.7.3 Caso #3: Movimiento en un solo eje

Se estudiará a continuación el efecto que sobre el ángulo de inclinación ideal tiene variar bien horizontalmente o bien verticalmente el CdG global, en contraposición a los apartados anteriores.

3.7.3.1 En un solo eje, 100 km/h R300

100 KMH R=300

Según esquema adjunto, usaremos como módulo de variación de velocidad la hipotenusa de la variación de inclinación del apartado 3.3.1 y lo aplicaremos sobre el eje global “Y”, y posteriormente, en el “Z”, tras lo cual compararemos resultados.

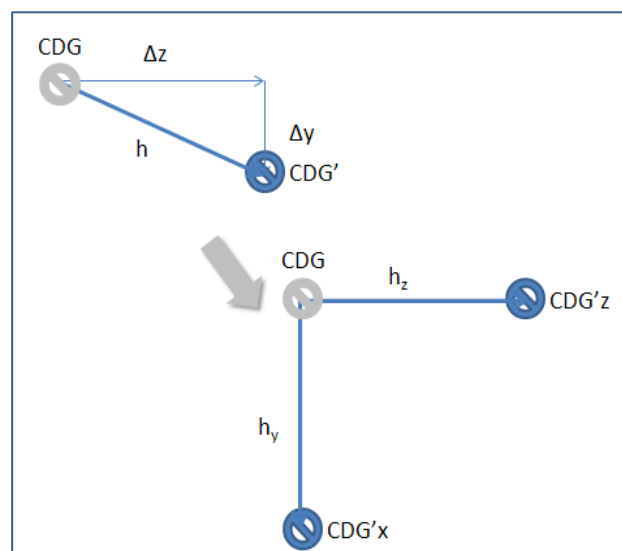
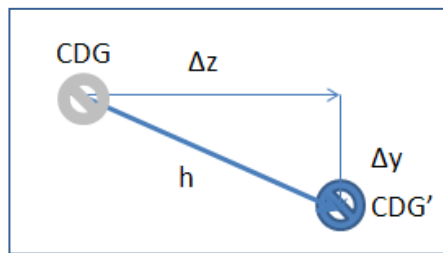


Ilustración 18 Equivalencia traslación un eje

| | Piloto erguido | Piloto inclinado |
|-------|----------------|------------------|
| Y[mm] | 609.13 | 599.13 |
| Z[mm] | 160.35 | 187.71 |



Siendo, según el esquema

$$\Delta z = z_{\text{piloto_inclinado}} - z_{\text{piloto_erguido}}$$

$$\Delta y = y_{\text{piloto_erguido}} - z_{\text{ypiloto_inclinado}}$$

Por tanto:

- $\Delta y = 10 \text{ mm}$
- $\Delta z = 27,6 \text{ mm}$

Y para el cálculo de h , Teorema de Pitágoras

$$h = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2}$$

Resultando $h = 29,13$, valor que usaremos para variar (sumando en el caso de movimiento en z , y restando en el de y) tanto vertical como horizontalmente el CDG respecto el del piloto erguido, así:

| | Piloto erguido | Piloto inclinado (Δy) | Piloto inclinado (Δz) |
|-------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Y[mm] | 609.13 | 580 | 609.13 |
| Z[mm] | 160.35 | 160.35 | 189,48 |

Y usando las ecuaciones enumeradas en los anteriores apartados, quedaría:

| | Piloto erguido | Piloto inclinado (Δy) | Piloto inclinado (Δz) |
|-----------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| φ | 14,75° | 15,45° | 17,28° |
| V_r | 100,2 km/h | 102,67 km/h | 108,92 kmh |
| Ganancia | | 2,46% | 8,7% |

Tabla 6 Mejora por eje

Por la geometría, afecta más movimiento en el “eje z”, pero menor que con el movimiento combinado del apartado anterior, que arrojaba un máximo de 8,9% de variación

Afecta más el Z.

3.7.3.2 En un solo eje, 150 km/h R300

Usando los mismos razonamientos que en el apartado anterior, se tomarán como datos de referencia los del caso#2, estudio a)

Así, se tiene:

| | Piloto erguido | Piloto inclinado:caso a) | Piloto inclinado:caso b) |
|--------|----------------|--------------------------|--------------------------|
| Y [mm] | 546,88 | 516,14 | 533,37 |
| Z [mm] | 312,41 | 340,47 | 352,47 |

De donde se deduce:

- $\Delta y = 30,74$
- $\Delta z = 28,06$

Y calculando:

$$h = 41,62104$$

Sumando dicho valor en módulo:

| | Piloto erguido | Piloto inclinado (Δy) | Piloto inclinado (Δz) |
|--------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Y [mm] | 546,88 | 505,259 | 546,88 |
| Z [mm] | 312,41 | 312,41 | 354,031 |

De modo que:

| | Piloto erguido | Piloto inclinado(Δy) | Piloto inclinado (Δz) |
|------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|
| φ | 29,74° | 31,72° | 32,92° |
| V_{real} | 147,72 km/h | 153,54 km/h | 157,15 km/h |
| Ganancia | | 3,94% | 6,4% |

Tabla 7 Mejora por eje, 2

Con las hipótesis tomadas, las ganancias son en todos los casos son menores al variar el mismo módulo en un solo eje que variar el centro de gravedad en ambos componentes, y siempre influye más la variación de componente “z”.

3.7.4 Caso #4: Otras inclinaciones

Fijando un ángulo concreto (en este caso $R=300$ m), analizamos cómo afecta a la velocidad de paso por curva la inclinación del conjunto moto+ piloto, aplicando la fórmula:

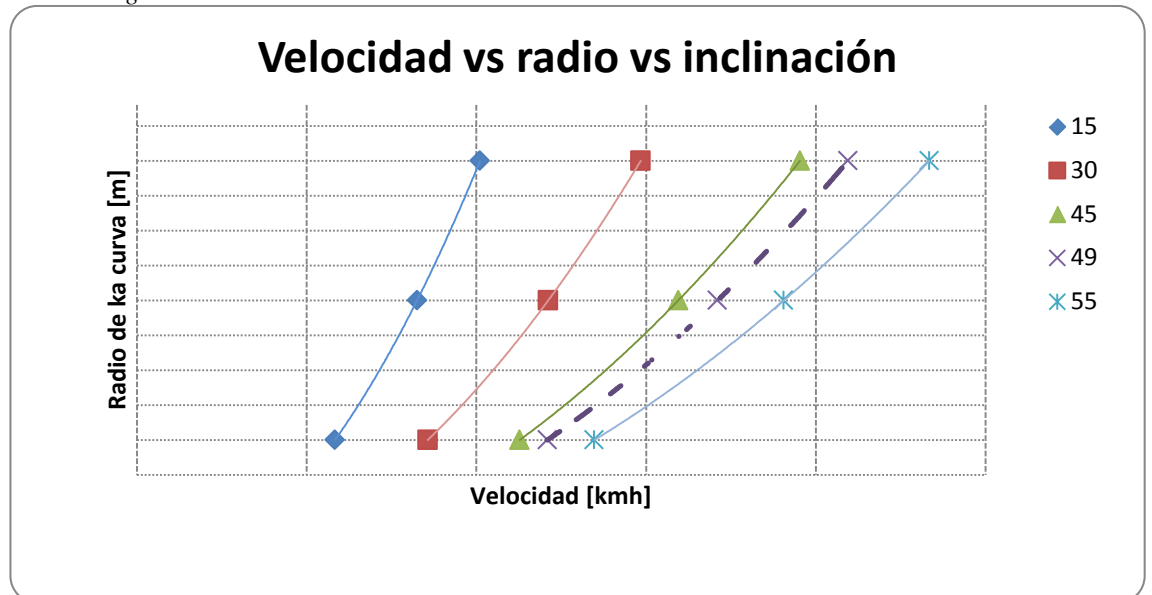
$$\sqrt{\tan(\varphi) \times R \times g} = V_{real}$$

Elegimos los ángulos de inclinación, 15° , 30° , 45° , 49° (por ser el máximo ángulo que permite inclinar nuestra moto con las estriberas modeladas) y 55° (por ser el máximo ángulo típico en conducción deportiva) (Cossalter, 2006)

Nos queda:

| | $\psi=15^\circ$ | $\psi=30^\circ$ | $\psi=45^\circ$ | $\psi=49^\circ$ | $\psi=55^\circ$ |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| R=100m | 58 kmh | 85 kmh | 112 kmh | 120 kmh | 134 kmh |
| R=200m | 82 kmh | 121 kmh | 159 kmh | 171 kmh | 190 kmh |
| R=300m | 101 kmh | 148 kmh | 195 kmh | 209 kmh | 233 kmh |

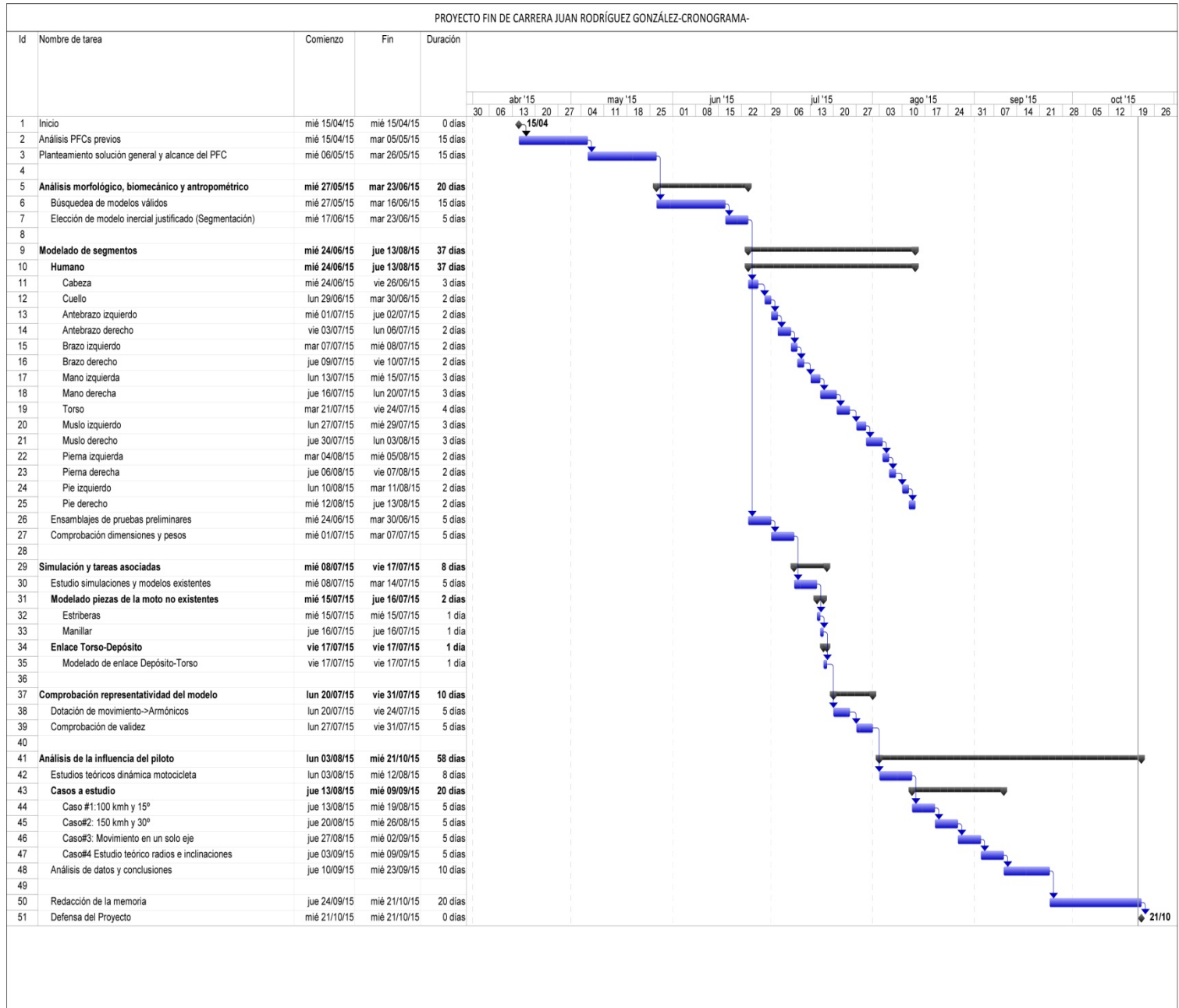
Tabla 8 Velocidad vs Ángulo de inclinación vs Radio



En morado discontinuo tenemos la línea que representa el ángulo máximo de nuestra motocicleta de referencia (limitado por las estriberas), de modo que obtenemos una velocidad máxima para el radio de curvatura con el que hemos trabajado en los anteriores apartados ($R=300$), de: **$V_{m\acute{a}x}=209,47\text{kmh}$** .

4. Cronograma y presupuesto

4.1 Cronograma



4.2 Presupuesto

- **Costes directos:**
- **Personal**

Suponemos dos recursos asignados 4 horas diarias (dedicación 50%) con el siguiente reparto de tareas

- ✓ Ingeniero Junior: Modelado y análisis preliminares
- ✓ Ingeniero Senior: Supervisión y toma de decisiones

| Recurso | Dedicación [% día] | Días | Tarifa[€/hora] | Coste [€] |
|------------------|--------------------|------|----------------|-----------|
| Ingeniero Junior | 50% | 110 | 30 | 13200 |
| Ingeniero senior | 50% | 33 | 45 | 5940 |

Total coste personal: 19.140 €

- **Equipos**
 - Supuesto dedicación absoluta del recurso al Proyecto.
 - Plazos de amortización previos al inicio de este Proyecto no debe repercutir sobre el presupuesto de éste. Se contempla por tanto “valor inicio Proyecto”.

VC: Valor compra [€]

n: Periodo amortización [meses]

T.D.M: Tasa de depreciación mensual (VC/n) [€/mes]

nProy: Duración en meses del Proyecto

V.I: Valor al inicio del Proyecto [€] $(VC - \text{amortización acumulada al inicio})$

V.F: Valor al finalizar uso $(V.I - \text{amortización durante } n\text{Proy})$ [€]

C.I: Coste del equipo imputable al Proyecto $(V.F.-V.I.)$ [€]

| Recurso y año de compra | V.C. | n | T.D.M | nProy | V.I. | V.F. | C.I. |
|-------------------------|------|----|----------|-------|------|------|------|
| PC Toshiba (2012) | 1000 | 60 | 1000/60 | 6 | 334 | 224 | 100 |
| PC Acer (2014) | 1200 | 60 | 12000/60 | 6 | 880 | 760 | 120 |

Total coste equipo: 220 €

- **Licencias**

Licencia SW Solid Works 2007: 3.000€

- **Costes indirectos**

Se calcula como el 20% de la suma de los costes anteriores:

$$0,2 \times (19.140 + 220 + 3000) = \underline{4472€}$$

Total coste del Proyecto

$$\text{Costes directos} + \text{costes indirectos} = 22360 + 4472 = \underline{26.832 €}$$

5. Conclusiones y proyectos futuros

Se enumera a continuación lo logrado en este Proyecto en relación a los objetivos marcados originalmente:

Como primer objetivo se proponía modelar un piloto dimensionalmente válido, objetivo que consideramos cumplido por las siguientes razones:

- Las hipótesis de segregación en segmentos tomadas son respaldadas por estudios biomecánicos (según aproximación cinemática), principalmente 15 segmentos rígidos indeformables y articulados.
- Los datos fuentes son estadísticamente confiables (amplio espacio muestral, distribución normal), satisfacen la práctica totalidad de los requisitos, y sus limitaciones han podido ser solventadas justificadamente.
- El modelo, una vez ensamblado, cumple las dimensiones de referencia y su CdG se localiza en el punto que debe (parte inferior del torso).

Se asumió como segundo objetivo principal verificar la validez funcional del modelo, lo que se demostró con una simulación que dota al piloto de los movimientos necesarios para variar su CdG. Como evidencia, se mostraron datos de la traslación del CdG del torso.

Analizando el último objetivo, las conclusiones que se derivan del análisis teórico de la influencia de la postura del piloto en la dinámica de la motocicleta son:

- La postura del piloto influye de manera relevante en la maniobra de mantenimiento de giro, siendo, sin embargo, ineficaz para iniciar éste por sí solo.
- Esto indujo a estudiar más profundamente dicha fase de la conducción (mediante casos representativos) y tras valoración de sus efectos asociados, realizar de manera justificada ciertas simplificaciones

(despreciar momentos giroscópicos) y fijar las condiciones a tener en cuenta (considerar estado de equilibrio) para la correcta interpretación de los resultados de los casos a estudio, que concretando fueron:

- Dado un radio de giro, la velocidad de paso por curva no es función de la masa, sino sólo del ángulo de inclinación (suponiendo coeficiente de rozamiento suficiente para evitar deslizamiento de la rueda).

- La ganancia de paso por curva debida a la variación de la posición del CdG del conjunto moto-piloto por la inclinación de éste hacia el interior de la curva (respetando las limitaciones impuestas por nuestro modelo), en el caso más favorable a estudio (ángulo de inclinación 15°), es de casi el 9%.

Por todo ello, consideramos dimensional y funcionalmente válido el modelo propuesto.

Como proyectos futuros citaremos:

Aprovechar la movilidad de la cual dispone el nuevo modelo de piloto para comparar los resultados de simulaciones de proyectos anteriores con piloto rígido.

Emplear hipótesis derivadas del estudio teórico y datos dimensionales para exportar modelo del piloto a otro software más adecuado a la biomecánica (como por ejemplo basado en Total Human Model for Safety -THUMS-, Global Human Body Models Consortium –GHBMC-, o a menor escala Adams).

Bibliografía

- Cocco, G. (2004). *Motorcycle Design and Technology*. Girgio Nada Editore s.r.l.
- Colomer, R. (2008). Simulación del comportamiento dinámico de una motocicleta mediante Cosmos Motion. Leganés, Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Cossalter, V. (2006). *Motorcycle Dynamics*. Vittore Cossalter.
- Española, R. A. (s.f.). RAE. Obtenido de <http://www.rae.es>
- Foale, T. (2003). *Motocicletas. Comportamiento dinámico y diseño de chasis. El arte y la ciencia*.
- González, J. (2010). P.F.C.: Desarrollo e implantación de procedimiento de ensayo y calibración de un banco de potencia de turismos. Leganés, Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Kapandji, I. (1987). *Cuadernos de fisiología articular (Tomos: 1,2 y 3)*. Masson.
- Nordin, M. a. (2004). *Biomecánica básica del sistema musculoesquelético*. Mc Graw Hill.
- Soto, V. a. (1996). Parámetros inerciales para el modelado biomecánico del cuerpo humano. *Revista Motricidad*, 169-189.
- Vence, N. (2008). P.F.C.: Simulación del comportamiento dinámico en 3D de una motocicleta en fase de frenada y entrada en curva. Leganés, Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Vera, P. (1989). Técnicas de análisis en biomecánica deportiva: estado actual y perspectivas. *Jornadas Unisport sobre tecnología del deporte*. Málaga: Unisport.
- Vera, P., Hoyos, J., & Ramiro, J. y. (1987). Tecnología aplicada al análisis biomecánico en el deporte. *Educación física y deporte de base*. Granada.

Viladot Voegeli, A. (2000). *Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor*.
Springer.

Anexos

Parámetros inerciales para el modelado biomecánico del cuerpo humano



Parámetros
Inerciales.pdf

Datos antropométricos de la población laboral española



Datos
antropométricos de la

Cronograma del Proyecto



Cronograma.pdf